SÉRIE , N°
N° D'ORDRE :

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE CAEN

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

Jacques FEUILLADE

1re THÈSE

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE D'UN LAC DE BARRAGE : LE LAC DE VÉZINS (MANCHE)

2e THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le *devant la Commission d'Examen :*

MM. DANGEARD *Président*

JACQUET
Mme GAYRAL *Examinateurs*

1965

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - Paris VIIe

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547014_0014

Série , N°
N° d'ordre :

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE CAEN

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

Jacques FEUILLADE

1re THÈSE

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE D'UN LAC DE BARRAGE : LE LAC DE VÉZINS (MANCHE)

2e THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le *devant la Commission d'Examen :*

MM. DANGEARD *Président*

JACQUET, Mme CAYRAL *Examinateurs*

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - Paris VIIe

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE CAEN

LISTE DES PROFESSEURS :

MM.	Lozac'h	Doyen, Professeur (Chimie)
	Dangeard	Professeur (Géologie)
	Scherer	Professeur (Physique générale)
	Apery	Professeur (Mathématiques pures)
	Jacquet	Professeur (Microbiologie)
	Pitot	Professeur (Botanique)
	Campbell	Professeur (Mécanique rationnelle)
	Vialle	Professeur (Chimie)
	Cojan	Professeur (Physique)
	Pallu de la Barrière	Professeur (Mathématiques)
	Pham	Professeur (Mathématiques)
	Giacomo	Assesseur, Professeur (Physique)
	Monier	Professeur (Minéralogie)
	Conia	Professeur (Chimie)
	Pareyn	Professeur (Géologie)
Mme	Gayral	Professeur (Botanique)
MM.	Romanet	Professeur (Chimie générale)
	Binet	Professeur (Botanique)
	Thureau	Professeur (Physique)
	Nataf	Professeur (Mathématiques)
	Pinazzi	Professeur (Chimie)
	Rybak	Professeur (Physiologie animale)
	Lubet	Professeur (Zoologie)
	Doguet	Professeur sans chaire (Biologie végétale)
	Mabboux-Stromberg	Professeur sans chaire (Physique)
	Bernard Maurice	Professeur sans chaire (Chimie)
	Barrat	Professeur sans chaire (Physique)
	Legros	Professeur sans chaire (Physique)
	Gault	Professeur sans chaire (Chimie)
Mlle	Demeusy	Professeur sans chaire (Biologie)
Mme	Blancheton	Professeur sans chaire (Mathématiques)
MM.	Deschanvres	Professeur sans chaire (Chimie)
	Thuillier	Professeur sans chaire (Chimie)
	Mollier	Maître de conférences (Chimie)
	Kauffmann	Maître de conférences (Microbiologie du sol)
	Cachon	Maître de conférences (Zoologie)
	Signoret	Maître de conférences (Zoologie)
	Mercouroff	Maître de conférences (Physique)
	Pons	Maître de conférences (Physique appliquée)
	Fortini	Maître de conférences (Électronique)
	Hervé	Maître de conférences (Mécanique appliquée)
	Lehmann	Maître de conférences (Physique)
	Bernard Jean	Maître de conférences (Mathématiques)
	Boulet	Maître de conférences (Psychophysiologie)
Mme	Grandet	Maître de conférences (Mathématiques M. P.C.)
M.	Caucal	Conseiller administratif, Chef des Services administratifs de la Faculté des Sciences.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE D'UN LAC DE BARRAGE
LE LAC DE VÉZINS (MANCHE)

J. FEUILLADE

Institut national de la Recherche agronomique,
Station d'Hydrobiologie continentale du Paraclet (Somme)

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

SOMMAIRE

Sommaire 7

Avant-propos 11

Introduction 12

Historique 13

PREMIÈRE PARTIE

Le lac de Vézins : géographie et géologie

a) Caractères morphologiques du lac 15

b) Situation géologique, conditions géographiques 20

DEUXIÈME PARTIE

Caractères physico-chimiques de l'eau

a) Les points d'étude 23

b) Facteurs thermiques 24

c) Facteurs chimiques 44

1. *L'oxygène dissous* 44
2. *L'alcalinité et les carbonates* 48
3. *Le fer* 51
4. *Le manganèse* 57
5. *L'azote* 59
6. *Le phosphore* 60
7. *L'oxydabilité* 61
8. *Le chlore* 64
9. *Le sodium* 65
10. *Le potassium* 66
11. *Le calcium* 67
12. *Le magnésium* 68
13. *Le soufre* 69
14. *Le résidu sec* 70
15. *La conductivité* 71
16. *La transparence* 72
17. *Les proportions et rapports chimiques* 72
    — Mg/Ca 72
    — K/Na 74
    — Na/Cl 75
    — Alcalins/Alcalino-terreux 76

c) Facteurs physico-chimiques spéciaux. 79

1. *Le pH* 79
2. *Les phénomènes d'oxydo-réduction* 81

TROISIÈME PARTIE

Facteurs biologiques

A — Le plancton 87

a) Phytoplancton 87

1. *Étude chronologique des récoltes* 87
2. *Liste des espèces citées* 96
3. *Les espèces principales* 102
4. *Les variations dans le lac* 108

b) Zooplancton 109

1. *Les espèces du zooplancton* 109
2. *Étude chronologique des récoltes* 111
3. *Les variations saisonnières* 114

B — Le Benthos 115

C — Liste des espèces d'Invertébrés citées 117

D — Les plantes supérieures. *Elodea densa* (PLANCH.) CASP. 120

E — Conclusions à l'étude biologique 121

QUATRIÈME PARTIE

Les sédiments

A — Généralités 123

B — Étude descriptive 125

C — Étude physique 131

a) Granulométrie 131

b) Teneur en eau 132

c) pH et rH 132

d) Capacité d'échange 134

1. *Généralités* 134
2. *Cas des sols* 135
3. *Cas de la vase* 135

D — Étude chimique 138

a) Généralités 138

b) Le carbone organique 139

c) Les carbonates 139

d) L'azote total 140

e) Le fer et le soufre 142

f) Le manganèse 143

g) L'activité déshydrogénante 144

E — La vase dans l'amont du lac 146

F — Fractionnement de la phase organique 146

a) Généralités 146

b) Les méthodes existantes 147
c) Étude des acides aminés 149
1. *Méthode* 149
2. *Résultats* 153
d) Étude des lipides 154
1. *Méthode* 154
2. *Résultats* 156
e) Étude des glucides 157
1. *Méthode* 157
2. *Résultats* 158
G — Essais de reproduction expérimentale de la formation des varves 158
a) Données préalables 158
b) Méthode 160
c) Essais 161
d) Observations écologiques 166
e) Conclusions des essais 166
Conclusions générales 168
Bibliographie 171

AVANT-PROPOS

Je suis particulièrement reconnaissant à M. le Professeur L. DANGEARD d'avoir bien voulu me proposer ce sujet d'étude.

M. P. VIVIER, directeur de la Station centrale d'Hydrobiologie appliquée, m'a donné son accord et m'a laissé la plus grande liberté dans la conduite de ces recherches; qu'il trouve ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

Je conserverai un souvenir ému de M. A. WURTZ, qui fut mon directeur à la station du Paraclet, dont l'érudition scientifique a été pour moi une source de documentation et qui mit son importante collection de tirés-à-part à ma disposition.

M. et Mme les Professeurs J. JACQUET et P. GAYRAL ont accepté de juger ce travail ; je leur suis très reconnaissant de la bienveillance qu'ils veulent bien m'accorder.

L'impression de ce travail a pu être menée à bien grâce à l'Institut national de la Recherche agronomique. Je présente mes remerciements respectueux à M. le Directeur général J. BUSTARRET, qui a bien voulu me donner les autorisations nécessaires.

Je remercie les techniciens de la station du Paraclet pour les services qu'ils ont eu parfois l'occasion de me rendre, Mlle S. MABILLE, Mme M. C. SOUILLÉ, M. H. EL-GHERBI, ainsi que ma femme qui m'a accompagné fréquemment dans mes déplacements, quel que soit le temps, et qui m'a apporté sur place une aide particulièrement efficace sans laquelle il m'aurait été très difficile d'effectuer avec précision certaines mesures et certains prélèvements. Je dois ajouter que ses encouragements ne m'ont jamais fait défaut.

Je me propose de dresser une monographie limnologique du lac de barrage de Vézins. Cette monographie présentera encore bien des lacunes et des imperfections. Des détails, qu'il serait intéressant d'approfondir, se rencontrent à chaque pas et ils pourraient occuper une équipe importante de chercheurs spécialisés, pendant longtemps.

INTRODUCTION

La Limnologie est actuellement définie : la science qui étudie les eaux douces (Congrès international de Kiel, 1922). Elle a débuté par l'étude des lacs, d'où son nom, et encore de nos jours de nombreux chercheurs ne se consacrent qu'à cet aspect des eaux continentales. Considérée ainsi, elle a des rapports très étroits avec l'océanographie, science plus ancienne et bien plus développée à laquelle elle a d'ailleurs emprunté de nombreuses méthodes d'investigation, tant pour l'étude de la physico-chimie de l'eau que pour celle des sédiments sous-lacustres. La Limnologie est donc une branche des Sciences naturelles qui étudie des phénomènes actuels.

Mais les eaux douces se présentent, aussi, sous l'aspect de collections d'eau plus petites, étangs, mares, ainsi que sous celui d'eaux courantes, en mouvement plus ou moins rapide, fleuves, rivières, torrents et ruisseaux. Si les méthodes d'investigations sont encore dérivées, bien souvent, de celles utilisées par les océanographes, elles sont quand même, dans leur ensemble, assez différentes et les phénomènes rencontrés intéressent moins généralement le géologue. L'étude de ces eaux est souvent menée vers un but plus précisément biologique que géologique, cas où l'intérêt pouvait être centré sur les dépôts inorganiques et ceux des organismes morts.

Par ces méthodes d'étude, la Limnologie est encore, en raison de toutes les analyses qu'elle entraîne, reliée très étroitement à la Chimie et même à la Biochimie, à la Microbiologie, les microbes des eaux et des sédiments étant abondants et ayant une action très importante sur l'évolution du milieu qui les entoure, et aussi à la Physique, entre autres, pour les études de température, conductivité, acidité, oxydo-réduction, tension superficielle, dynamique de l'eau.

Nous avons dans la Limnologie, une science encore jeune et en pleine évolution où presque chaque étude ouvre de nouveaux horizons et fait découvrir de nouvelles possibilités de recherches.

HISTORIQUE

La Limnologie, en tant que branche spéciale des Sciences naturelles, n'a pris naissance que depuis les travaux du Pr F. A. FOREL, en Suisse (en 1872). Par la suite, son développement fut le plus rapide dans les pays d'Europe centrale ayant relativement peu, ou pas, d'ouvertures sur la mer.

En France, son développement est resté lent. La première tentative pour monter une étude cohérente d'ensemble est due à l'administration des Eaux et Forêts, et seulement à la fin de l'entre-deux-guerres. Depuis le mois de janvier 1964, les anciennes stations ont été prises en charge par l'I.N.R.A.

La liste des limnologues serait cependant déjà longue. A leur début, les études dominantes furent menées par les chercheurs de langue allemande, tandis qu'actuellement les travaux d'Amérique du Nord sont les plus nombreux. D'importants résultats sont, aussi, obtenus en Russie, mais leur diffusion est freinée par les difficultés de traduction.

Principalement sous l'influence des chercheurs américains, deux points se sont particulièrement développés dans l'étude moderne des lacs.

En premier lieu, l'étude des propriétés thermiques de l'eau qui sont à la base de l'explication des mouvements intra-lacustres et conditionnent certaines qualités chimiques et, en second lieu, l'étude du métabolisme des lacs considérés comme des organismes à l'intérieur desquels existent des processus biochimiques liés étroitement entre eux, et de grands échanges d'énergie.

Le lac de Vézins a déjà été le sujet de quelques études : de la part de l'abbé P. FRÉMY [65] (1937), qui étudia une pêche de plancton, de A. JOURNAUX [101] (1953), qui découvrit des varves dans le sédiment observé en place, lors de la mise à sec de 1952, et de L. DANGEARD [44] (1953) qui compléta la note précédente par l'étude géologique des échantillons.

PREMIÈRE PARTIE

LE LAC DE VEZINS, ÉTUDE GÉOGRAPHIQUE

a) Caractères morphologiques du lac

Le lac de Vézins est un lac d'origine artificielle dû à la construction d'un barrage en béton du type à voûtes multiples et datant de 1932. Il se trouve sur la rivière Sélune qui débouche dans la baie du mont Saint-Michel au sud d'Avranches et il est localisé à 20 km de la mer. Cette situation est particulière du point de vue climatique, les hivers dans cette région n'étant qu'exceptionnellement très froids en raison de l'influence marine et, d'autre part, les températures maximales d'été étant souvent élevées au fond de la baie proche.

La Sélune est un petit fleuve côtier qui n'a que 70 km de cours mais qui reçoit un abondant chevelu d'affluents et draine une région où les précipitations mensuelles moyennes sont comprises entre 60 et 75 mm pour le mois de juillet et dépassent 100 mm en octobre. La carte pluviométrique de la France indique que le bassin est situé principalement dans une région de pluviosité annuelle 800 et 1 000 mm et partiellement dans une zone de pluviosité annuelle de 1 000 à 1 500 mm. La surface du bassin versant est de 720 m^2 (1) et le débit moyen naturel au barrage, calculé sur une période de 30 ans, est de 9,8 m^3/s. Les turbines peuvent aspirer un débit maximal de 54 m^3/s, tandis que la crue maximale observée de la Sélune au barrage fut de 140 m^3/s ; inversement, en période d'étiage, le débit naturel peut tomber à 1,5 m^3/s. Le volume du lac créé par le barrage est de 19 000 000 m^3 à la cote maximale, dont une tranche utile turbinable de 7 000 000 m^3. La cote de retenue normale du lac est de 60 m et celle du point le plus profond, un peu en amont du pied du barrage, est de 27 m.

Les prises d'eau sont au nombre de trois, situées toutes au même niveau ; chacune comprend deux conduites forcées jumelées de 2,5 m de diamètre à l'entrée et dont la section décroît vers les turbines et s'évase vers l'entrée. Les points bas des ouvertures des conduites forcées, dans le barrage, sont à la cote 48,5 et la disposition de ces ouvertures met le point haut à la cote $48,5 + 6,0 = 54,5$ m et leur axe à 51,25 m. Le barrage a une longueur de crête de 278 m.

Le lac est limité par le barrage et le point où le niveau de l'eau est encore celui imposé par l'ouvrage ; il débute donc à 100 m en aval du pont de Virey, contre une petite digue de retenue des eaux de la Sélune proprement dite. Il présente un dévelop-

(1) Ces renseignements sont relevés dans la notice technique concernant le barrage de Vézins qui m'a été aimablement communiquée par l'Administration de l'E. D. F.

pement dans son axe de 15,77 km pour une longueur mesurée à vol d'oiseau, entre ces deux points extrêmes, de 8,75 km, soit guère plus que la moitié. Ceci est dû à son origine ; l'aspect sinueux qui correspond au trajet de la vallée barrée se retrouve dans presque tous les lacs ayant la même origine artificielle et leur donne, dès le

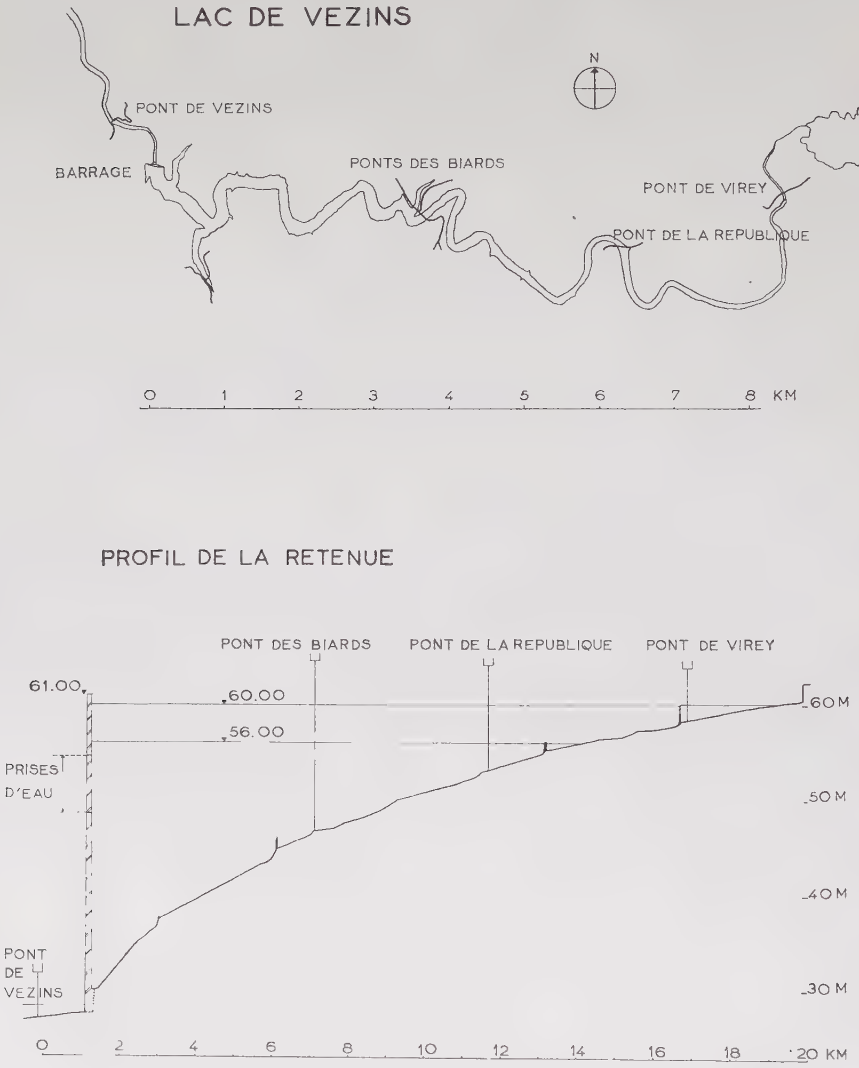

Planche 1.

premier abord, un aspect commun caractéristique. La largeur moyenne, qui est aussi, assez souvent, la largeur réelle entre le pont de la République et les abords du barrage, se situe aux environs de 130 m. (planche n° 1, carte du lac).

L'examen du profil en long montre un approfondissement très régulier au début, qui s'accentue brusquement au cours des six derniers kilomètres. Je n'ai pas retrouvé

la fosse signalée comme existante à 1 km en amont du barrage par J. Hirt [88] (1962). La présence d'une telle fosse, est d'ailleurs, fort peu probable, sauf le cas d'une ancienne carrière submergée, d'étendue obligatoirement limitée dans l'espace. Nous supposerons donc que cette fosse n'existe pas (voir la planche n° 1 reproduite d'après les levées du niveau de l'ancienne rivière par l'I. G. N. ; il y a lieu de soustraire l'épaisseur supposée de l'eau, ce qui ne change l'allure du tracé qu'à l'amont des petites retenues repérées).

Le calcul de la profondeur moyenne d'un tel lac donnerait une valeur totalement dépourvue d'intérêt pratique car les figures du type de lac correspondant à cette profondeur moyenne ne seraient jamais retrouvées.

Il serait illogique, à chaque point d'étude physico-chimique choisi, de ne pas se placer à l'endroit qui, sur la section transversale du lac, correspond à la plus grande profondeur. Une autre difficulté rencontrée est due aux variations de niveau fréquentes et irrégulières déterminant une nouvelle particularité de ce type de lac. Pour établir une profondeur moyenne, par la méthode classique, qui consiste à diviser le volume de la masse d'eau par sa surface, il faut disposer de ces valeurs pour le niveau moyen du lac, donc connaître la cote moyenne de la surface ; si, par exemple nous prenons, pour Vézins, la moyenne entre les cotes extrêmes possibles, nous avons : $\frac{60 + 56}{2} = 58$, alors que la cote moyenne calculée pour 11 mois de 1961 est : 59,32. Quant au calcul de la surface à une cote donnée, qui se fait par la méthode habituelle au planimètre, il est d'autant plus délicat que la forme est tourmentée, et le rivage plus découpé.

Pour ces raisons, principalement pour obtenir des valeurs moyennes plus représentatives en chaque point, une autre méthode est à rechercher ; des auteurs ont d'ailleurs déjà signalé qu'en raison de la section en V, la profondeur moyenne calculée par les méthodes habituelles est toujours exprimée par un chiffre relativement faible par rapport à l'aspect général du lac et aux relevés de profondeur donnés lors des mesures (P. Vivier [175], 1956).

Toutes les études de comparaisons étant faites suivant l'axe de plus grande profondeur du lac, je considère comme plus représentatives, dans ce type de lac, les profondeurs moyennes calculées sur l'axe de plus grande profondeur pour des portions du lac successives que nous appellerons biefs et dont le découpage pourra être préfiguré par l'allure du lac lui-même ; pour aboutir à une réelle simplification de l'étude, nous éviterons de multiplier anormalement le nombre de ces biefs. On pourra constater que les variations planctoniques correspondent avec le découpage retenu, donc avec cette façon de voir. Les profondeurs moyennes calculées seront appelées : profondeurs maximales moyennes.

Nous limiterons nos biefs par les extrémités du lac et les emplacements de ruptures de pente naturelle du fond, particulièrement marquées, qui avaient été autrefois aménagées pour de petits moulins actuellement submergés. Ceci nous donne trois biefs successifs en partant du barrage :

Le bief A : du barrage à la dénivellation du lieu dit « Le Grand-Moulin », situé à 5,09 km en amont. La ligne de plus grande profondeur de ce bief passe de la cote 29,40 au pied du barrage, les canalisations de vidange étant établies plus bas, à la cote 44,00. soit une dénivellation de 14,60 m dont il résulte une

pente moyenne de 0,28 p. 100. La profondeur maximale moyenne pour 1961 est alors de :

$$\frac{(59{,}32 - 29{,}40) + (59{,}32 - 44{,}00)}{2} = 22{,}62 \text{ m.}$$

TABLEAU I

Profondeur du lac au pont des Biards en 1961
(mètres)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
12	13	13	13,5	14	14	13,5	13,5	13,5	13	13,5	—
— 2	— 1	— 1	— 0,5	0	0	— 0,5	— 0,5	— 0,5	— 1	— 0,5	—

La perte de niveau moyenne est donc de 0,68 m correspondant à la cote 59,32 et à la profondeur moyenne, au pont des Biards, de 13,32 m.

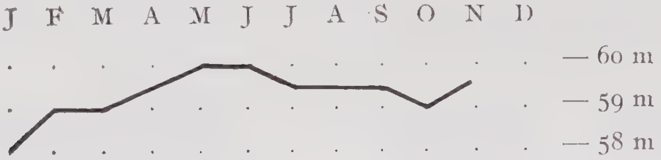

FIG. 1. — *Variation du niveau du lac en 1961.*

Le bief B : de Grand-Moulin à la dénivellation située à proximité du lieu dit « La Jariaie », à l'ancien moulin de la charbonnière. Ce point est situé à 12,22 km du barrage, ce qui nous donne une longueur de 7,13 km pour ce bief ; c'est pratiquement à l'extrémité amont de ce dernier que se termine la retenue du barrage à la cote minimale d'utilisation. Nous avons, aux deux extrémités, les cotes 44,70 et 55,20, soit une dénivellation de 10,5 m, d'où il résulte une pente moyenne de la ligne de plus grande profondeur de 0,15 p. 100. La profondeur maximale moyenne en 1961 est :

$$\frac{(59{,}32 - 44{,}70) + (59{,}32 - 55{,}20)}{2} = 9{,}37 \text{ m.}$$

Le bief C : du moulin de la charbonnière à l'extrémité amont du lac au lieudit « Moulin-de-Virey », où la Sélune tombe dans le lac, soit à 15,77 km du barrage, avec un bief de 3,55 km.

Aux deux extrémités, les cotes du fond sont respectivement de 55,40 et 58,30, ce qui représente une dénivellation de 2,90 m, la pente moyenne de la ligne de plus grand fond est de 0,08 p. 100 ; la profondeur maximale moyenne est :

$$\frac{(59{,}32 - 55{,}40) + (59{,}32 - 58{,}30)}{2} = 2{,}47 \text{ m.}$$

Pour les mêmes biefs, il est aussi possible de mesurer sur une carte à grande échelle la largeur en plusieurs points régulièrement espacés et, en prenant la moyenne

arithmétique de ces valeurs, de calculer une largeur assez bien représentative de la portion considérée.

	Largeur moyenne en m	
Biefs	à 60,00	à 59,32
A	155	150,4
B	107	99,7
C	65	50,9

Nous pouvons tirer de là le rapport P/l représentatif de l'allure de chaque profil en travers :

pour A P/l # 0,150
pour B P/l # 0,094
pour C P/l # 0,048.

Ces résultats sont schématisés sur la figure 2.

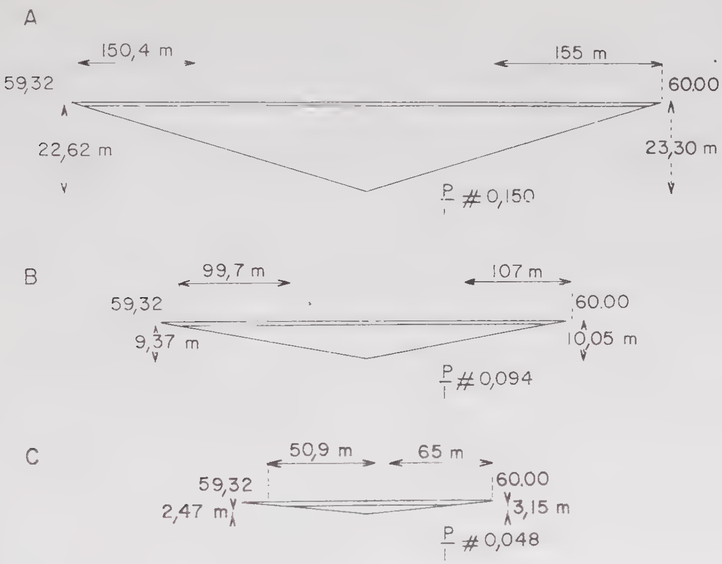

FIG. 2. — *Profils théoriques moyens par bief*

Chaque bief est assimilable à une pyramide tronquée dont les deux bases seraient les sections des extrémités supposées parallèles et la hauteur, la longueur du bief. Il est possible de calculer le volume occupé ainsi, mais, même en ajoutant les volumes correspondant aux trois principaux bras affluents du lac, nous tombons à une valeur très en-dessous de la capacité réelle donnée par l'E. D. F. Ceci est dû à ce que la section du lac n'est probablement pas, en général, un triangle ordinaire, mais un triangle curviligne dont les deux côtés sont convexes vers l'extérieur du lac. L'impossibilité d'obtenir une carte bathymétrique précise, empêche de dresser un

tableau des volumes d'eau retenus à chaque cote, de mètre en mètre, tableau qui permettrait des développements très intéressants des résultats physico-chimiques, en particulier le calcul de l'énergie thermique retenue par le lac aux différents mois.

b) Situation géologique, conditions géographiques

Le cours de la Sélune est situé en totalité, ainsi que celui de ses affluents, sur des terrains appartenant au massif armoricain. La partie de la rivière affectée par la retenue a été creusée dans les roches du Briovérien représentées par des schistes qui, à la carrière située contre le pont de la République par exemple, sont varvés. Plusieurs autres carrières sont ouvertes à proximité immédiate du lac, dont deux très importantes. L'une débute à 500 m en aval du barrage et l'autre est située plus en amont au début du lac ; cette dernière, par ses eaux de lavage et de drainage très chargées de particules en suspension, contribue aux apports de sédiments exogènes.

Au sud du lac, en direction du bourg de Hamelin, un massif de roche cristalline borde quelques centaines de mètres du rivage.

Sur la plus grande partie de son pourtour, le lac est d'accès très difficile ; on rencontre des roches en surplomb et surtout des éboulis couverts de broussailles dont la pente se prolonge sans transition sous les eaux. En bordure, le déblaiement n'a pu porter que sur la couche très réduite de terre qui existait entre les blocs. Il n'y a pas encore eu formation d'une véritable beine dépassant 1 m de large, sauf au droit des quelques prairies existant sur la face convexe de certains méandres, par exemple en amont du pont des Biards. Ceci donne presque partout des berges constituées de blocs qui cèdent sous les pas. Avant la mise en eau, les arbres devant être submergés n'ont pas été tous abattus, certains troncs affleurent ou se trouvent sous une faible profondeur d'eau, ils sont susceptibles de provoquer des détériorations ou la perte des appareils et engins d'étude.

Tous les terrains de la région sont les mêmes que ceux qui encaissent directement le lac ; ce sont des roches dures et imperméables, recouvertes d'une couche de terre argileuse, reste des limons formés au quaternaire, dont l'épaisseur est d'ailleurs très réduite sur les pentes. Il s'ensuit un ruissellement abondant lors des chutes de pluie qui se traduit par une augmentation rapide du débit de tous les petits tributaires du lac et des affluents de la Sélune. Les eaux arrivant alors sont très chargées en débris de toute sorte, minéraux principalement, dont les plus gros se déposent dès leur arrivée dans le lac en constituant des deltas d'alluvions relativement importants ; les particules les plus fines, restant en suspension plus longtemps, tombent lentement vers le fond en pleine eau. Étant donné la forme étroite du lac et le grand nombre des arrivées d'eau sur le pourtour, cet apport sédimentaire doit se répartir sur la totalité du fond, en amenant partout des particules plus grosses que celles capables de se déposer dans les mêmes conditions, dans un lac de forme plus ramassée et où les distances à la rive, de beaucoup de points, sont plus grandes que celles trouvées ici.

Il n'a pas été constaté de variations journalières du niveau très importantes dans le lac de Vézins et la variation annuelle maximale mesurée en 1961 fut de 2 m, ce qui est suffisant pour expliquer la pauvreté de la faune littorale et l'absence presque complète de la flore submergée sur les bords. L'absence complète de la flore de ce

TABLEAU 2

Débits journaliers de la Sélune
(Année 1961)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	29,79	29,92	20,29	9,44	8,32	5,84	2,14	1,76	2	1,32	1,87	6,64
2	33,53	32,43	15,91	10,39	9,90	5,15	1,32	1,93	2	1,37	2,97	10,68
3	37,83	41,79	15,68	11,19	8,78	4,71	3,31	3,53	2	1,24	2,33	10,28
4	37,91	39,94	15,17	10,07	9,72	3,75	1,71	1,89	0,56	0,91	2,02	18,56
5	41,06	45,47	15	8,02	9,68	4,26	2,08	1,54	1,39	1,53	1,87	18,76
6	41,21	39,17	13,85	8,41	8,97	3,35	3,12	1,45	0,95	1,39	2,16	12,71
7	48,08	33,73	13,77	7,36	8,13	4,05	1,94	1,72	1,17	1,45	2,39	14,59
8	42,31	31,17	12,74	7,04	7,22	3,54	2,07	1,54	1,35	1,32	3,80	10,94
9	44,48	28,81	12,79	6,29	6,88	4,72	1,94	1,63	1,10	1,14	5,44	13,14
10	47,07	26,09	12,50	7,35	7	4,15	1,67	1,32	1,10	1,45	6,59	21,38
11	41,11	24,74	12,64	8,22	5,77	3,97	2,91	1,67	0,97	0,92	7,48	23,42
12	33,91	23,22	11,56	7,08	5,55	4,54	2,27	1,43	1,33	1,24	4,19	21,13
13	30,92	23,02	11,68	7,05	5,32	4,65	4,07	1,10	0,98	0,95	3,75	14,66
14	29,46	20,62	10,86	6,29	5,30	5,27	5,10	1,35	1,42	0,88	3,26	15,58
15	27,39	19,61	10,65	18,32	5,19	3,64	2,72	1,32	1,49	0,88	2,95	11,61
16	25,41	18,14	9,78	13,82	5,23	3,27	4,85	1,72	1,10	1,42	2,28	10,77
17	23,74	17,85	9,47	8,47	4,66	3,20	3,91	1,76	1,32	1,79	2,59	9,15
18	21,10	16,20	9,73	7,54	4,81	2,87	3,34	1,76	1,04	3,09	2,08	8,37
19	20,39	17,05	9,49	6,74	4,76	3,37	3,48	1,10	1,06	2,98	1,66	8,30
20	20,43	15,26	9,10	7,12	4,41	2,85	2,17	1,54	1,71	1,83	2,44	7,44
21	19,66	14,81	8,94	7,11	4,42	2,80	2,65	2,14	1,01	1,49	1,70	7,84
22	18,90	15,70	8,31	7,67	4,27	2,76	3,04	1,32	1,36	1,54	2,30	7,67
23	17,43	16,26	7,94	10,16	4,43	2,62	2,41	1,75	0,66	3,17	1,84	7,67
24	16,84	19,11	8,28	7,85	4,34	2,99	2,63	1,76	1,32	3,74	1,70	6,44
25	17,49	19,05	8,61	8,40	4,31	2,21	2,08	1,32	1,17	14,02	1,87	6,18
26	16,06	18,34	7,51	19,88	4,97	2,55	2,21	1,84	1,21	7,82	2,70	7,18
27	15,16	19,68	7,91	16,10	3,83	2,85	1,97	1,10	1,55	5,46	20,97	6,34
28	22,43	27,66	7,62	10,82	3,75	2,56	3,09	2,37	1,08	4,31	23,13	6,77
29	24,67		8,62	8,57	3,89	2,72	3,33	2,37	1,69	2,70	11,34	7,92
30	20,76		8,02	8,63	3,85	2,21	2,43	2	1,04	2,78	6,93	9,45
31	26,52		10,08		3,92		1,72	2		3,43		9,94
Débit moyen m³/sec	28,74	24,80	11,11	9,38	5,85	3,72	2,69	1,71	1,27	2,57	4,62	11,35
Pluviométrie. mm	108,8	58	12,09	85,1	36,7	29,6	98,2	19,5	29,6	93,7	79,3	92,8

type est le cas général dans les lacs de barrage industriels ; ici, il y a une exception : l'*Elodea densa* (PLANCH.) CASP., que j'ai déjà signalée, en ce lieu et dans le lac inférieur de la Roche-qui-boit, comme plante nouvelle pour la France (J. FEUILLADE [56], (1962). Grâce à ses longues tiges, elle peut s'enraciner à plus de trois mètres sous le niveau maximal de l'eau et avoir cependant assez de lumière et n'être émergée que très exceptionnellement. Une grande baisse de niveau, de plus de 4 m, par exemple, peut être qualifiée d'accidentelle dans l'utilisation normale du lac ; elle n'est décidée que rarement, pour des réparations urgentes ou des vidanges périodiques, pour l'entretien du barrage et des conduites forcées.

Pour 1961, nous sommes amenés aux mêmes constatations que celles relevées lors de l'étude du lac de barrage d'Éguzon (P. VIVIER et coll. [175], 1956), à savoir que, sauf accident, le niveau est pratiquement aussi constant que celui d'un lac naturel, pendant au moins plusieurs mois de l'année correspondant aux mois les plus chauds et au début de l'automne ; cela permet à un lac de barrage de se stratifier comme un lac naturel pendant cette saison.

Si nous examinons les débits de la Sélune pour la même période (voir tabl. 2), nous constatons une crue en janvier et février, maximum 48,08 m³/s enregistrés le 7 janvier, qui s'étale ensuite durant mars ; en avril, nous avons sensiblement le débit moyen naturel, 9,8 m³/s, puis le débit baisse beaucoup pour être minimal en septembre, 1,27 m³/s (avec le minimum journalier le plus faible enregistré le 4 avec 0,56 m³/s) et remonte ensuite progressivement jusqu'en décembre où il atteint celui relevé en mars précédent. Comparé au débit de la Creuse au lac d'Éguzon, celui de la Sélune est plus faible ; en effet, le débit moyen de la première est de 45 m³/s, soit 4,6 fois celui de la seconde, celle-ci se déversant dans une retenue qui n'est que 2,2 fois plus petite que celle d'Éguzon (43 000 000 m³). Nous trouvons aussi des débits extrêmes plus rapprochés : le débit maximal enregistré pour la Creuse est de 900 m³/s et celui de la Sélune de 140 m³/s, soit 6,4 fois moins. Inversement, le débit minimal enregistré pour la Sélune est plus élevé que celui de la Creuse (0,00 m³/s) et jamais nul. Nous avons donc un régime que nous ne pouvons plus qualifier de torrentiel, comme cela a été fait pour la Creuse. D'ailleurs, si les eaux ruissellent vite sur les pentes, une grande partie est tout de même retenue dans le limon du sol dans certaines cuvettes comme le bassin de la Sélune en amont du lac, autour de la ville de Saint-Hilaire-du-Harcouët. Il n'y a pas non plus, dans le département de la Manche, de chutes de neige comparables à celles qui tombent sur le bassin de la Creuse, donc pas de crues aussi importantes correspondant à la fonte de cette neige.

D'autre part, le rapport du volume de la retenue au débit est plus grand pour la Sélune à Vézins que pour la Creuse à Éguzon, ce qui permet de mieux amortir les demandes de l'usine en entraînant une variation de niveau plus faible dans le lac, d'où un régime moins perturbé pour celui-ci. La forte pluviosité de janvier 1961, par exemple, a permis de laisser remonter le niveau des eaux qui était au point le le plus bas, tout en continuant à bénéficier du même débit à l'usine en février où la pluviosité était beaucoup plus faible.

Le débit moyen de la Sélune en 1961 a été de 8,98 m³/s ; la pluviométrie : 739,39 mm est également peu éloignée de la moyenne annuelle locale. Nous constatons donc que, bien qu'il soit toujours plus ou moins risqué d'extrapoler une étude de ce genre que des nécessités interférentes rendent toujours trop brève, nous avons bénéficié, en 1961, d'une année pratiquement moyenne par ses facteurs climatiques.

DEUXIÈME PARTIE

CARACTÈRES PHYSICO-CHIMIQUES

a) Les points d'étude

J'ai dû choisir ces points en fonction des possibilités d'accès, l'importance du matériel transporté nécessitant d'amener un véhicule à proximité immédiate des emplacements de travail, et la longueur du lac rendant pratiquement impossible son parcours entier, à chaque voyage, à l'aide d'une barque sans moteur.

Le premier point retenu est situé à 20 mètres en amont du pont dit « de Vézins, » sur le lac de la Roche-qui-boit, sur la rive sud qui est ici la plus abrupte. Ce point a été appelé point zéro pour mettre en évidence qu'il est en dehors du lac de Vézins. La Sélune y est peu large et le courant est assez fort lorsque les turbines de Vézins fonctionnent ; parfois, l'eau y est assez chargée de matières en suspension à cause de la grande carrière exploitée à proximité, mais les plus grosses particules sont déjà sédimentées. Ce point est à un kilomètre sous le barrage et donne les valeurs relatives à l'eau après la sortie du lac, une fois les principaux remous des turbines calmés. En raison de cette agitation de l'eau brassée dans les turbines, et de la proximité immédiate des principaux bancs d'*Elodea densa* repérés, le dosage de l'oxygène ne peut pas présenter d'intérêt pour une comparaison avec les valeurs trouvées dans le lac supérieur et n'a donc pas été régulièrement effectué ici.

La proximité de l'*Auberge du Lac*, louant des barques pour la pêche, m'a permis d'établir le point suivant sur le lac à 300 mètres environ du barrage et de bénéficier ainsi d'une grande profondeur en pleine eau. J'ai appelé ce point, point n° 1, ou « Barrage » ; il se retrouvait de la façon suivante : sortir du bras du lac passant sous l'auberge dans l'axe de ce bras et se diriger droit sur l'axe du thalweg situé en face, axe matérialisé par un ruisseau coulant dans le thalweg ; le point 1 est au-dessus de la plus grande profondeur, qui peut se repérer à la sonde, des alignements complémentaires facilitant le repérage. Le vent, entraînant toujours une dérive plus ou moins rapide, il est utile de s'ancrer en immergeant un corps lourd vers le vent et de se laisser revenir jusqu'en-dessus du point 1 avant de fixer le câble à la barque ; il persiste quelques oscillations de la barque par rapport au point fixe, mais elles sont, en général, de faible amplitude. En raison de la forme des barques disponibles, l'ancrage, ainsi que le travail nécessitant l'immersion de câbles conducteurs électriques, ne sont pas réalisables correctement dès que le vent prend une certaine force.

Le point suivant est situé sur le pont des Biards, point n° 2 placé très exactement dans l'axe de la travée la plus large, sur le bord sud. Le type du pont et la largeur du lac sont tels que la présence des piles les plus proches n'introduit que des modifica-

tions négligeables dans la physico-chimie de l'eau ; en revanche, on retrouve le point avec une précision rigoureuse, la profondeur peut être mesurée de façon très exacte et l'accès est aisé, limitant le portage du matériel à la distance parcourue sur le pont.

Le point n° 3 est pris au pont suivant appelé « Pont-de-la-République » (la carte d'état-major actuelle portant l'indication : Port-Neuf-Moulin). Les mesures et les prélèvements d'eau ont été effectués à 15 mètres en aval du pont, sur la rive sud.

Le point n° 4 est destiné à donner l'état de l'eau de la Sélune à l'arrivée dans le lac ; il est situé au bord de la rivière, sur la rive Est, contre le muret qui prolonge la digue de retenue des eaux tombant dans le lac et à 2 mètres en amont du début de cette digue, le pont dit « de Virey » étant situé à quelques dizaines de mètres en amont de ce point, celui-ci peut-être désigné : point 4 ou Pont-de-Virey.

b) Facteurs thermiques

L'eau est un corps présentant plusieurs anomalies dans ses propriétés physiques. Sa propriété, qui est de ce point de vue la plus intéressante en limnologie, est sa variation de densité avec la température, cette densité passant par un maximum à 3,94°C, soit sensiblement à 4°C. Pour cette raison, c'est la densité de l'eau choisie à 3,94°C, et sous une pression normale de 1 atmosphère, qui est prise comme unité et posée égale à 1. La densité de la glace à 0° est de 0,916 8, tandis que celle de l'eau à la même température est 0,999 86, ce qui correspond à une réduction de volume au passage de l'état solide à l'état liquide. A 30°C, la densité est 0,995 67. Ces valeurs étant pour une pression de 1 atmosphère, la densité de l'eau augmente régulièrement avec la pression, donc avec la profondeur dans un lac (Strøm [162] 1945).

Si nous examinons maintenant la différence de densité de l'eau pure par degré centigrade de différence de température, nous constatons qu'elle est minimale au voisinage de 4°C et qu'elle augmente en s'éloignant de cette température aussi bien au-dessus qu'au-dessous. Il en résulte que quarante fois plus de travail est nécessaire pour mélanger des masses d'eau respectivement à 30 et 29°C, que pour mélanger les mêmes masses d'eau à 5 et 4°C parce que la différence de densité dans ces deux cas est sensiblement quarante fois plus dans l'un que dans l'autre.

Si le phénomène précédent intervenait seul, la courbe représentant la variation de la température de l'eau avec la profondeur, dans un lac, devrait toujours montrer simplement une diminution rapide dans les premiers mètres, suivie d'une diminution plus lente, mais régulière, jusqu'au fond. Or, ce n'est pas le cas général, un facteur très important modifie ce schéma, c'est l'action du vent. Dans le cas des lacs de barrage industriels, la prise d'eau joue, aussi, un rôle perturbabeur, dont l'importance dépend de son niveau par rapport à la surface et aussi du débit.

Sur le lac de Vézins, les mesures superficielles ont été faites à l'aide d'un thermomètre à mercure de précision, les mesures en profondeur à l'aide d'une électro-sonde à thermistor reliée à un pont de Wheatstone (appareil Métrix, Annecy), dont la description détaillée est donnée par B. Dussart [53] (1953) qui l'a utilisé pour le Léman et les lacs voisins. L'appareil doit être étalonné au laboratoire, et les mesures de surface au thermomètre à mercure servent aussi à le contrôler, avant chaque emploi sur le terrain. Contrairement à Dussart, je n'ai pas observé le moindre décalage sur une période de plus de deux ans, même après le changement de la pile ; cet appareil

apparaît très sûr ; il est, d'autre part, robuste et permet d'obtenir, avec précision, le 1/20 de degré. Je disposais d'un câble immergeable de 50 mètres que j'ai gradué de mètre en mètre par une bague de chatterton. Je relevais les températures de mètre en mètre, à partir de la surface, et, au besoin, à l'intervalle de 50 centimètres, lorsque la variation rencontrée était particulièrement importante.

Étude des variations thermiques du lac

Les valeurs exactes mesurées sont portées sur les tableaux 3 à 10 et sur le tableau 13.

L'ancienne définition de BIRGE (1897) : thermocline = zone où la baisse de température excède 1° par mètre, étant maintenant pratiquement abandonnée par tous les chercheurs, nous suivrons l'usage général qui consiste à appeler thermocline, le plan où la baisse de température est la plus rapide (BRÖNSTED et WESENBERG-LUND, 1911). Nous pouvons utiliser, alors, le terme de « couche du saut » pour désigner toute la zone, de part et d'autre du thermocline, où la baisse de température reste rapide par mètre et qui ne correspond ni à la définition de l'épilimnion, ni à celle de l'hypolimnion, où la stratification thermique doit être négligeable. La présence de plusieurs thermoclines a été déjà rapportée, elle provient, en général, d'un réchauffement superficiel dû à l'action directe des rayons solaires.

La première courbe obtenue au barrage, le 28 octobre 1960, est très régulière et présente l'allure générale théorique connue pour les lacs naturels, avec un réchauffement superficiel. Ce jour-là, le vent était très faible, même nul par moments. Le thermocline était situé entre 19 et 19,5 mètres de profondeur, marqué sur la courbe par une inflexion caractéristique.

En janvier 1961, nous trouvons, au contraire, des eaux froides, sans stratification thermique, le lac est en période de circulation (*overturn*). Le vent est très fort, il souffle en rafales et brasse les eaux de la retenue.

Par la suite, les relevés montrent souvent, au pont des Biards, des températures légèrement supérieures à celles trouvées au Barrage ; ceci est dû à l'orientation des portions du lac correspondantes, NW-SE au point 1, donc particulièrement soumise à l'action directe des vents dominants locaux, tandis que la portion traversée par le pont des Biards est, très exactement, perpendiculaire à la première et à un endroit où le lac est très encaissé. La profondeur plus faible au point 2, joue aussi un rôle dans l'établissement de la courbe thermique, qui y est trouvée. On y note, en 1961 la formation et le maintien, plus précoce, d'une stratification avec un thermocline proche de la surface. Le thermocline principal du barrage ne peut se retrouver toute l'année au pont des Biards, en raison de l'insuffisance de profondeur.

Les courbes du 29 août et du 2 septembre 1961 montrent les différences superficielles correspondant à un temps couvert, avec averses abondantes, pour la première et à un temps ensoleillé, orageux, particulièrement chaud, pour la deuxième.

1962 a été, du point de vue météorologique, une année particulièrement froide, il y eut un réchauffement tardif de la température et un refroidissement précoce en fin d'année. Les relevés, dans le lac, traduisent cette évolution extérieure. A partir de juin, le niveau du lac a été abaissé pour réparer les vannes de l'évacuateur de crues, ceci a entraîné une modification importante des facteurs régissant l'établissement de la stratification thermique, la profondeur est passée à 25 mètres seulement au

TABLEAU 3

Dosages et mesures au point 0 en surface
(Pont de Vezins)

	O 1960	J 1961	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Température (°C)	—	6	9	10,5	13	14,5	17	19,5	18	19	13	8	—
Oxygène (mg/l)	—	11,8	13,4	—	11,4	11,8	12,5	13,2	—	—	—	—	—
Fer (mg/l)	1,13	0,014	0,09	0,28	0,98	0,312	0,312	—	0,230	0,27	0,42	0,7	0,2
Azote nitrique (mg/l)	1,06	1,22	1,02	1,22	0,90	0,89	1,22	0,08	0,80	0,85	0,78	0,90	0,93
Azote ammonial (mg/l)	0,33	0,26	0,10	0,05	0,05	0,05	0,15	0,05	0,05	0,46	0,46	traces	traces
Azote total dosé (mg/l)	1,39	1,48	1,12	1,27	0,95	0,94	1,37	0,93	0,85	1,31	12,4	0,90	0,93
Phosphore (mg/l)	traces	traces	traces	traces	traces	0,003	0,088	0,016	0,016	0,065	0,016	0,00	0,006
Oxydabilité (mg/l O²)	6,20	2,05	9	3,74	3,50	4,12	3,18	3	4,08	2,68	4,66	4,38	4,55
Résidu sec (mg/l)	112,5	90	90	105	105	110	80	100	105	100	100	117,5	52,5
Chlore (mg/l)	17,4	21	19,1	18,5	18,8	16,6	21	19,5	22,8	18,5	18,5	21	13,5
Calcium (mg/l)	9,6	6,4	8,2	7,4	7	7,2	6,80	8,4	9,2	8	8	8	5,6
Magnésium (mg/l)	5	3,9	5,7	4,2	5,4	4,6	3,90	5	4,4	6,7	6,7	4,2	3,1
Sodium (mg/l)	9	12,75	12,30	15,2	14,5	12,2	14,1	12	12,5	14,1	14	14,85	12,2
Potassium (mg/l)	2,3	1,8	0,7	1	1,8	2,35	2,2	2,3	2,5	2,32	2,64	2,66	2,85
Conductivité ($\times 10^{-6}$ mho/cm)	108,3	115,9	117,2	115	115,4	94,8	99,7	121	127,3	120,8	126,9	139,8	116,5
Alcalinité (mg/l CO_3Ca)	39,98	27,13	25,88	29,63	29,45	18,21	34,99	36,41	40,70	29,63	36,23	39,63	24,1

TABLEAU 4

Dosages et mesures au point 1
(Barrage; température °C)

	O 1960 (28)	J 1961 (25)	F (28)	M (23)	A (20)	M (18)	J (19)	J (24)	A (29)	S (2)	S (26)	O (30)	N (27)	D (29)
Surface	12,55	6,00	9,00	11,30	14,60	17,4	20,50	23,65	18,45	23,00	20,05	13,90	8,00	6,60
0,50	↕	↑	↑	10,90	↕	↕	↕	23,20	↕	22,95	19,65	13,80	—	↑
1 m	12,15			10,80	14,50	17,40	20,30	22,85	18,35	22,90	19,45	13,55		
2	11,95			10,70	14,35	17,30	18,90	21,60	18,15	22,65	19,05	13,40	--	
3	↑			↑	13,70	16,80	16,90	20,80	18,10	21,10	18,90	↕	-	↓
4	↓			↓	12,95	16,45	16,45	18,30	18,05	19,00	18,85	13,40		6,60
5	11,90			10,60	12,80	15,95	16,10	18,00	18,00	18,25	18,70	13,35		6,25
6	↑			10,40	12,70	15,00	15,70	17,80	17,95	18,00	18,60	13,40		6,15
7				10,30	12,40	14,40	15,40	17,60	17,90	17,85	18,10	↑		↑
8				10,25	12,25	13,90	14,85	17,10	17,85	17,65	17,75	↓		
9	↓			10,05	11,95	13,50	14,30	16,80	17,80	17,45	17.45	13,40		↓
10	11,80			10,00	11,80	13,20	14,20	16,45	17,25	17,15	17,10	13,20		6,00
11			↓	9,70	11,40	12,90	13,75	15,90	16,55	16,80	16,70	13,10		↕
12	11,75		8,90	9,60	10,80	12,60	13,45	14,75	15,20	16,10	16,00	12,95		6,00
13	11,25		8,60	9,40	10,35	12,05	13,10	13,90	14,30	15,10	14,95	12,85	—	5,70
14	11,15		8,40	9,20	9,90	11,60	12,70	13,20	13,20	14,05	13,70	12,70	—	5,35
15	10,80		↑	9,10	9,75	11,15	11,40	11,85	12,00	12,60	12,40	12,15	-	5,20
16	10,55	↓	↓	9,05	9,35	10,70	10,70	10,80	11,00	11,35	11,20	11,55	—	5,10
17	10,30	6,00	8,30	8,90	9,10	10,05	9,90	10,15	10,35	10,50	10,35	10,60	—	5,10
18	9,85	5,95	↑		9,05	9,50	9,55	9,60	9,90	9,90	9,80	10,05	—	4,85
19	9,00	5,90		8,80	8,90	9,10	9,20	9,30	9,45	9,60	9,55	9,70	—	4,85
20	8,10	↑		8,70	8,85	9,00	9,20	9,05	9,20	9,40	9,25	9,35		4,75
21	7,75			8,55	8,80	8,85	8,90	8,95	9,05	9,15	9,10	9,10		4,50
22	7,40			8,40	8,55	8,70	8,70	8,70	8,90	8,90	8,90	8,95	–	↕
23	7,20	↓		8,15	8,30	8,55	8,55	8,50	8,70	8,65	8,75	8,80	—	4,50
24	7,05	5,30		8,05	8,22	8,45	8,50	8,40	8,55	8,52	8,65	8,75	—	↑
25	7,00	↑		7,90	8,15	8,30	8,30	8,35	8,50	8,40	8,60	8,65	—	
26	6,95			7,80	8,05	8,20		8,30	8,40	8,40	8,50	8,55	—	
27	↑	↓		↑	↑	↑	8,30	8,25	8,35	8,25	8,35	8,50	–	
28		5,30	↓	↓			8,10	↑	8,30	8,25	↑	8,45	–	
29			8,30	7,80	↓		↑	↓	8,25	8,20	↓	8,40	—	↓
29,50	↓				8,05	↓	↓	8,25	8,25	8,15	8,35		—	4,40
30	6,95					8,20	8,10							

TABLEAU 4 (*Suite 1*)

		O. 1960		J. 1961	F	M	A	M	J	J	A (29)	S (2)	S (29)	O	N	D
Oxygène (mg/l)	Surface	7,9	Surface	—	12,6	—	17,3	15,3	15,5	14,0	—	9,2	10,4	6,2	6,2	9,6
	— 5 m	7,2	— 5,5 m	—	10,3	—	11,6	14,8	14,9	11,10	—	4,3	2,1	6,10	—	—
	— 10	7,4	— 11	—	12,7	—	13	11,2	10,3	10,1	—	0,3	0,2	5,00	—	—
	— 15	6,9	— 16,5	—	7,7	—	10,3	9,9	7,7	8,1	—	0,3	0,1	0,30	—	—
	— 20	0,4	— 22	—	12,7	—	9,5	7,9	8,8	8,5	—	0	0,1	0,00	—	—
	— 25	0	fond	—	9,6	—	6,2	9,2	4,8	6,4	—	0	0,00	0,00	—	10,3
	fond	0														
Fer (mg/l)	Surface	0,52	Surface	0,90	0,312	0,186	0,186	0,38	0,230	—	0,230		0,185	0,14	0,7	0,2
	— 5 m	0,21	— 5,5	traces	0,312	0,280	0,52	0,312	0,186	—	0,280		0,185	0,18	—	0,1
	— 10	0,24	— 11	traces	0,230	0,384	0,14	0,62	0,230	—	0,314		0,35	0,7	—	0,1
	— 15	0,34	— 16,5	traces	2,10	0,350	0,186	0,532	0,186	—	0,476		0,48	4,72	—	traces
	— 20	0,56	22	0,90	0,350	0,70	0,84	0,42	0,350	—	0,672		1,92	11,6	—	traces
	— 25	19,57	fond	traces	—	1,014	1,16	2,03	16,44	—	30,8		1,67	4,72	—	0,1
	fond	21,84														
Azote nitrique (mg/l)	Surface	0,90	Surface	1,10	0,92	1,12	0,98	0,8	1,02	0,84	0,76		1,00	0,86	0,76	0,92
	— 5 m	0,80	— 5,5	1,36	0,97	1,20	0,74	1,02	1,06	0,76	1,00		1,00	0,92	—	0,94
	— 10	1,12	— 11	1,02	0,92	1,22	1,16	0,95	1,22	0,82	0,98		0,82	0,81	—	0,90
	— 15	1,00	— 16,5	1,02	0,71	1,16	1,22	0,90	1,12	0,95	0,77		0,69	0,17	—	1,00
	— 20	1,00	— 22	1,10	0,92	1,10	0,94	0,98	1,12	1,08	0,85		0,21	0,19	—	0,73
	— 25	0,00	fond	1,12	0,98	1,02	1,02	0,68	0,25	0,21	0,22		0,13	0,15	—	1,00
	fond	0,00														
Azote ammoniacal (mg/l)	Surface	0,26	Surface	0,28	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		0,50	0,13	traces	traces
	— 5 m	0,30	— 5,5	0,26	0,05	0,05	0,05	0,05	0,33	0,05	0,05		0,50	0,22	—	—
	— 10	0,33	— 11	0,28	0,05	0,05	0,10	0,05	0,10	0,10	0,10		0,87	0,42	—	—
	— 15	0,23	— 16,5	0,30	0,30	0,05	0,05	0,15	0,10	0,13	0,13		1,16	1,30	—	—
	— 20	0,99	22	0,30	0,05	0,10	traces	0,05	0,05	0,13	0,34		4,33	1,25	—	—
	— 25	2,05	fond	0,26	0,23	0,64	0,80	1,22	0,57	1,50	0,60		1,4	0,75	—	—
	fond	1,80														
Azote total dosé (mg/l)	Surface	1,16	Surface	1,38	1,02	1,17	1,03	0,85	1,07	0,89	0,81		1,50	0,99	0,76	0,92
	— 5 m	1,10	— 5,5	1,62	1,02	1,25	0,79	1,07	1,39	0,81	1,05		1,50	1,14	—	0,94
	— 10	1,45	— 11	1,30	0,97	1,27	1,26	1,00	1,32	0,92	1,08		1,69	1,23	—	0,90
	— 15	1,23	— 16,5	1,32	1,04	1,21	1,27	1,05	1,22	1,08	0,90		1,85	1,47	—	1,00
	— 20	1,99	22	1,40	0,97	1,20	0,94	1,03	1,17	1,21	1,19		4,54	1,44	—	0,73
	— 25	2,05	fond	1,38	1,21	1,66	1,82	1,90	0,82	1,71	0,82		1,53	0,90	—	1,00
	fond	1,80														

TABLEAU 4 (Suite 2)

		O 1960		J 1961	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Phosphore (mg/l)	Surface	0,016	Surface	traces	0,003	traces	traces	0,20	0,01	0,019	0,085	0,003	0,011	0,00	0,006
	— 5 m	0,94	— 5,5 m	traces	traces	traces	traces	0,01	0,068	0,016	0,034	0,054	0,016	—	0
	— 10	0,003	— 11	0,003	traces	traces	traces	0,013	0,065	0,016	0,028	0,18	0,028	—	0,006
	— 15	0,00	— 16,5	0,005	traces	traces	traces	0,01	0,01	0,019	0,05	0,05	0,008	—	0
	— 20	traces	— 22	0,003	traces	traces	traces	0,124	0,01	0,016	0,019	0,195	traces	—	0,003
	— 25	traces	fond	0,005	traces	0,01	traces	0,117	0,006	0,019	traces	0,00	0,00	—	0,003
	fond	traces													
Oxydabilité (mg/l O_2)	Surface	7,00	Surface	2,22	4,82	3,32	3,17	3,74	3,02	2,10	2,55	3,14	4,2	4,45	4,62
	— 5 m	6,5	— 5,5 m	2,15	4,86	3,58	3,10	3,32	2,65	2,02	2,48	2,92	4,16	—	5
	— 10	6,94	— 11	2,38	4,34	3,26	2,46	4,24	2,20	2,42	2,35	3,16	4,70		5,22
	— 15	4,80	— 16,5	2,30	4,94	3,22	2,14	3,02	3,34	2,44	2,42	3,27	6,34	—	4,54
	— 20	3,50	— 22	2,30	3,02	3,30	2,44	3,34	2,24	1,56	1,96	3,08	8,74	—	4,60
	— 25	5,65	fond	2,40	4,04	3,64	3,12	3,85	14,22	2,44	7,06	13,04	8,64	—	4,22
	fond	10,9													
Résidu sec (mg/l)	Surface	50	Surface	117,5	125	140	95	105	97,5	80	160	62,5	110	112,5	77,5
	— 5 m	72,5	— 5,5 m	105	130	110	100	110	105	80	130	67,5	112,5	—	75
	— 10	87,5	— 11	95	97,5	85	125	100	120	75	130	107,5	130	—	62,5
	— 15	105	— 16,5	85	65	97,5	90	102,5	105	100	120	102,5	115	—	110
	— 20	105	— 22	127,5	87,5	85	70	122,5	82,5	77,5	90	100	145	—	90
	— 25	185	fond	85	90	95	107,5	115	170	75	137,5	177,5	152,5	—	115
	fond	182,5													
Chlore (mg/l)	Surface	17,8	Surface	20,7	18,6	18	18,8	16,4	20,70	20	21,8	18	18,1	21,2	22,6
	— 5 m	17	— 5,5 m	20,6	18,8	18,5	18,8	16,9	20	19,8	22	18,8	18,1		22
	— 10	16,2	— 11	21	18,6	18,4	19,5	16,4	20,30	19,2	22,8	17,8	19		22
	— 15	18,6	— 16,5	21,8	18,6	17,7	19	16,8	18,90	16,5	21	17,6	17,3		21,6
	— 20	20,4	— 22	21,6	19,2	17,2	19	18	19,60	18,6	20,8	17,4	17,4		21,8
	— 25	19,6	fond	21	18,5	16,7	19,2	17,5	21	17,8	21,8	17,00	16,7		22,6
	fond	20,6													
Calcium (mg/l)	Surface	18,8	Surface	6,8	7,6	7,6	6,8	9	7,40	8,4	20	8,2	8,8	8	5
	— 5 m	9,6	— 5,5 m	6,8	6,4	7	6,8	10	8	8,2	8,8	8	10,4		5,6
	— 10	10	— 11	6,8	7	10	7,2	10	8,20	8,4	8,4	8	8		5,2
	— 15	11,6	— 16,5	6,6	6,8	7,2	6,8	8,8	8	8,4	11	8	10,4	—	5,2
	— 20	9,2	— 22	7,00	7	6,8	7	8,6	7,60	8,4	8	8,6	9,2	—	5,2
	— 25	12	fond	6,8	6,8	6,6	7,4	9,6	12	9,2	8,6	8,6	9,6	—	5,2
	fond	16													

TABLEAU 4 (*Suite 3*)

		O 1960		J 1961	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Magnésium (mg/l)	Surface	2,7	Surface	3,7	6,1	3,2	5	3,9	4,20	5,5	4,2	8,5	4,3	4,8	3,6
	— 5 m	4,4	— 5,5 m	4,1	5,5	3,9	4,6	2,8	3,90	5,9	4,6	6,6	4,1	—	2,2
	— 10	4,3	— 11	4,2	4,4	3,6	5,3	3,2	4,10	6,7	4,7	8,4	6	—	3,7
	— 15	3,6	— 16,5	4,3	4,8	4,7	4,3	3,1	3,70	5	4,9	8,5	5,7	—	3,5
	— 20	5,3	— 22	3,8	5,6	4,3	4,3	3,8	3,90	5,5	4,8	7,4	7,2	—	3,6
	— 25	6,2	fond	4,3	5,5	5,4	4,4	4,1	7,80	6,1	6,8	8,3	7,9	—	3,8
	fond	8,4													
Sodium (mg/l)	Surface	9,4	Surface	12	12	14,6	14	12,2	12,5	11,5	12,5	14,3	14,10	15	13,8
	— 5 m	8,5	— 5,5 m	12	12	16,4	14	12,4	12	12,5	12,5	14,3	14,10	—	12,5
	— 10	9,5	— 11	12,50	12,30	15,8	14,5	12,2	13	11,5	12	14,1	14,10	—	12,5
	— 15	9,5	— 16,5	12,30	11	15,2	12,5	13	11	10	11,5	12	12,10	—	12,2
	— 20	9,7	— 22	12,50	11,75	15,2	12,5	12,2	12,5	11,5	12	12,5	12	—	12,2
	— 25	10	fond	12,30	11,50	14,5	12	12,7	11	11,5	11,5	12,1	12,25	—	11,9
	fond	10													
Potassium (mg/l)	Surface	2,75	Surface	2,3	1,5	0,5	0,66	2,5	2	2,4	2,5	2,48	2,72	2,70	3
	— 5 m	2,75	— 5,5 m	1,8	1	0,5	0,5	2,5	2,15	2,4	2,35	2,43	2,72	—	2,95
	— 10	2,75	— 11	2,5	0,5	0,5	0,66	2,5	2,10	2,6	2,5	2,64	3,05		2,85
	— 15	2,50	— 16,5	2,3	1,8	0,5	traces	2,64	2,10	2,45	2,45	2,41	2,56	—	2,85
	— 20	2,1	— 22	2,5	0,5	0,5	traces	2,2	2,05	2,3	2,4	3,02	2,56		2,59
	— 25	2,5	fond	2,5	0,5	1,75	0,5	2,78	2,3	2,4	3	3,33	3,48	—	2,50
	fond	3,1													
Conductivité × 10^{-6} mho/cm	Surface	111,9	Surface	116,8	114,2	115,4	114,8	109,3	112,1	123	148,8	122,2	123,1	133,4	124,5
	— 5 m	105,3	— 5,5 m	116,8	117,3	116,8	115	111,2	115,6	120	125,2	122,7	125,4	—	124,8
	— 10	107,3	— 11	117,3	115,6	122,2	118,1	112,7	118,3	127	133,1	124,3	129,7		127,6
	— 15	107,3	— 16,5	117	108,3	115,5	118,1	112,6	110,7	113	127	114,7	142,2	—	113,2
	— 20	119,6	— 22	116,8	115	114,8	116,2	114,9	116,5	119	122,8	128,8	150,5	—	111,6
	— 25	141,7	fond	116,8	110	117,1	120	122,7	188,6	134	149,1	164,6	177,6	—	111,9
	fond	181													
Alcalinité (mg/l CO_3Ca)	Surface	41,95	Surface	26,60	24,63	26,77	32,13	16,78	35,70	37,48	49,09	30,34	38,56	37,48	27,13
	— 5 m	34,99	— 5,5 m	28,56	27,31	29,99	33,38	16,60	37,48	36,59	36,59	29,99	37,84	—	24,28
	— 10	32,13	— 11	28,56	28,56	32,13	32,42	18,74	35,70	37,13	38,02	31,95	36,06	—	24,81
	— 15	29,99	— 16,5	27,67	28,02	27,13	28,92	16,42	36,77	35,70	43,55	30,70	—	—	33,91
	— 20	35,7	— 22	30,88	26,42	31,24	29,99	14,64	38,38	33,20	40,70	43,20	—	—	24,28
	— 25	53,55	fond	28,58	28,92	34,27	35,34	12,42		51,76	—	—	—		24,63
	fond	58,90													
pH			Surface	—	—	—	—	—	—	—	—	7,6	—	—	—

TABLEAU 5

Dosages et mesures au point 2
(Pont des Biards)

		O 1960	J 1961	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Température °C	Surface	12,4	7,15	9,9	11,5	15,2	18,75	19,90	22,25	19,40	19,9	13,4	9,05	
	0,50		↑	↑	11,4				22,25			↑	↑	
	1m					14,8	17,7	19,85	21,65	18,80	19,6			
					10,9					↑				
	2					14,5	17,2	19,70	20,40		19,3			
					10,8									
	3					14,2	15,9	17,30	19,10		19,3			
					10,6									
	4					13,7	15,2	16,55	18,80		19,05			
					10,5					↓				
	5					13,1	14,95	16,10	18,30	18,80	18,70			
					10,3							↓		
	6					12,9	14,7	15,75	18,05	18,65	18,10	13,4	↓	
			↓		9,9							13,3	9,05	
	7		7,10			12,8	14,5	15,35	17,75	18,20	17,80			
			↑	↓	9,3							12,95	8,9	
	8			9,8		12,4	14,25	14,95	17,40	17,70	17,6			
					9,1							12,35	8,7	
	9			9,7		12,1	13,9	14,50	17,05	17,40	17,4			
			↓		8,9							11,95	7,45	
	10		6,90	9,6	↑	12,1	13,7	14,20	16,60	17,20	17,2			
												11,90	7,00	
	11		6,30	9,0		11,9	13,15	14,00	16,10	16,85	17,0			
												11,85	6,95	
	12		6,25	8,6	↓	11,5	12,9	13,60	15,25	16,10	16,6			
	13			8,6	8,8	10,8	12,55	13,20	14,40	15,10	15,9	11,85		
						10,3			14,00	14,70	14,85		6,95	
	14						12,00	12,75						
Oxygène (mg/l)	Surface	7,7	11,6	13,6	—	13,5	17	13,2	17,1	—	9,6	6,2	6,5	—
	Milieu		11,3	12,8	—	11,8	13,9	8,9	7	—	0,5	6,0	6,4	—
	0,50 m du fond		11,0	12,2	—	7,2	11,3	3,8	5,6	0,00	0,2	5,8	7,5	—

TABLEAU 5 (*Suite 1*)

		O 1960	J 1961	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Fer (mg/l)	Surface	2,9	0,18	1,90	0,296	0,23	0,532	0,186	—	0,384	0,185	0,385	0,3	traces
	Milieu		0,034	3,08	0,28	1,54	0,70	0,280	—	0,350	0,27	0,315	0,3	—
	0,50 m du fond		0,048	1,16	0,63	5,80	0,98	0,532	—	1,224	0,38	0,840	0,95	—
Azote nitrique (mg/l)	Surface	1,2	1,20	0,69	1,36	1,02	0,98	0,95	0,51	0,68	0,8	0,60	0,92	1,16
	Milieu		1,20	0,82	1,22	0,88	0,92	1,10	0,58	0,89	0,95	0,81	0,82	—
	0,50 m du fond		1,16	0,85	1,22	0,68	0,73	0,44	0,14	0,20	0,74	0,68	0,94	—
Azote ammoniacal (mg/l)	Surface	0,36	0,30	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10	0,05	0,54	traces	traces	traces
	Milieu		0,30	0,10	0,05	0,05	0,10	0,10	0,05	0,10	0,54	0,26	traces	—
	0,50 m du fond		0,30	0,15	0,23	0,40	0,60	1,34	0,79	1,65	1,60	0,22	traces	—
Azote total dosé (mg/l)	Surface	1,56	1,50	0,79	1,46	1,12	1,08	1,00	0,61	0,73	1,34	0,60	0,92	1,16
	Milieu		1,50	0,92	1,27	0,93	1,02	1,20	0,63	0,99	1,49	1,07	0,82	—
	0,50 m du fond		1,46	1,00	1,45	1,08	1,33	1,78	0,93	1,85	2,34	0,90	0,94	—
Phosphore (mg/l)	Surface	traces	0,003	traces	traces	traces	0,01	0,003	0,016	0,039	0,119	0,011	0,00	0,00
	Milieu		traces	traces	traces	0,016	0,045	0,013	0,019	0,016	0,039	0,011	0,12	—
	0,50 m du fond		traces	traces	0,013	0,05	0,12	0,013	0,016	0,019	0,062	0,011	0,003	—
Oxydabilité (mg/l O_2)	Surface	6,22	2,1	5,94	3,92	3,26	4,20	2,06	2,90	2,88	2,43	4,72	5	2,16
	Milieu		2,1	6,16	3,42	4,24	2,80	2,05	3,72	3,10	3,04	5,06	4	—
	0,50 m du fond		1,9	5,40	3,18	4,95	4,40	3,75	4,04	3,48	3,74	9,45	3,58	—
Résidu sec (mg/l)	Surface	115	95	115	105	115	110	72,5	105	72,5	102,5	97,5	87,5	107,5
	Milieu		115	130	120	150	70	85	110	122,5	85	105	82,5	—
	0,50 m du fond		77,5	85	115	100	102,5	85	100	105	117,5	125	125	—
Chlore (mg/l)	Surface	18	20,4	18,8	18,1	18,7	16,8	20	19,8	22,5	18,4	19,7	20,8	23,2
	Milieu		20,8	18,5	17,8	18,1	17,4	19,4	20	22,4	18,2	18,3	21,6	—
	0,50 m du fond		20,6	19,6	18,6	18,4	16	19,4	19	21,3	18,2	18,9	21,6	—
Calcium (mg/l)	Surface	12	5,2	8,4	6	7,2	7,4	7,60	8,4	10	8,6	9	7,4	5,2
	Milieu		6,4	8	5,8	6	7	7,40	9	8,8	8,6	9,2	7,8	—
	0,50 m du fond		6	9,6	6,6	6,8	7,6	8,80	9,8	9,4	7,6	9	7,8	—
Magnésium (mg/l)	Surface	3,4	5,2	6	6	3,9	4,7	3,90	6,6	3	5,2	5,4	4,6	3,8
	Milieu		4,6	6,6	5,9	5,8	4,9	4,40	4,4	3,95	6	5,8	3,9	—
	0,50 m du fond		4,6	5,3	5,6	4,3	5	4,10	5,2	4,9	6	6,1	4,7	—

TABLEAU 5 (*Suite 2*)

		O 1960	J 1961	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Sodium (mg/l)	Surface	9,5	12,5	11,25	14,6	14	12,4	15,1	12,5	13	14,55	14,10	13,75	14,4
	Milieu		12,5	11,25	14,6	13,5	12,4	14,6	12	12,5	15	14	13,75	—
	0,50 m du fond		13,25	11,25	14,2	13,5	12,2	11	11,5	12,5	15	13,10	15,25	—
Potassium (mg/l)	Surface	1	2,3	0,7	0,75	1,5	2,2	2,1	2,4	2,5	2,46	2,8	2,73	2,42
	Milieu		1,5	2,5	0,5	1,5	2,4	2,2	2,5	2,45	2,60	3	2,76	—
	0,50 m du fond		1,5	1	2,25	1,32	2,9	2,1	2,5	2,6	2,84	4	2,64	—
Conductivité × 10^{-6} mho/cm	Surface	108,6	115,6	110,6	115,7	114,5	107	110,1	123	123,7	122,1	124,9	126,7	121,8
	Milieu		115,7	109,8	115,6	107,3	113,4	116,6	124	125,2	125,5	124,9	128,1	—
	0,50 m du fond		117,3	120,8	116,6	109,4	112,5	128,8	146	141,5	127,7	125,8	140,4	—
Alcalinité mg/l Co_3Ca	Surface	36,06	26,77	30,34	27,31	32,13	19,28	35,30	38,02	44,27	31,24	33,74	41,41	23,20
	Milieu		26,24	30,88	29,99	34,27	19,99	36,06	35,7	42,30	30,34	36,06	39,27	—
	0,50 m du fond		27,67	34,63	28,20	33,56	21,06	48,19	44,27	51,94	32,49	38,56	38,56	—
pH unités pH	Surface		—	—	—	—	—	—	—	—	7,4	—	—	—

TABLEAU 6

Dosages et mesures au point 3 en surface
(Pont de la République)

	O 1960	J 1961	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Température (°C)		7	11	10	16	16	20,5	22	19	20	12	8	
Oxygène (mg/l)	8,1	11,4	12,6		11,9	13,4	12,9	11,1		13,5	6,2	7,95	
Fer (mg/l)	3,10	0,014	4,82	0,70	1,08	0,312	0,186		0,314	0,27	0,42	0,2	traces
Azote nitrique (mg/l)	1,20	1,16	0,61	1,22	0,94	1,02	1,12	0,65	0,70	0,63	0,92	0,84	1,50
Azote ammonial (mg/l)	0,23	0,30	0,10	0,23	0,10	0,05	0,05	0,05	0,10	0,74	0,10	traces	traces
Azote total dosé (mg/l)	1,43	1,46	0,71	1,45	1,04	1,07	1,17	0,70	0,80	1,37	1,02	0,84	1,50
Phosphore (mg/l)	0,006	traces	traces	traces	0,05	0,009	0,54	0,053	0,019	0,81	0,011	0,006	0,015
Oxydabilité (mg/l O_2)	4,34	2,1	7,70	3,8	4,58	2,56	2,5	2,72	3,05	7,18	5,26	3,70	2,10
Résidu sec (mg/l)	105	90	75	75	110	90	75	95	100	92,5	102,5	97,5	67,5
Chlore (mg/l)	16,2	19,6	18	18,2	17,2	19,6	19,70	20,3	21,5	18,6	18,5	21,8	23,6
Calcium (mg/l)	12	6,4	8,4	8,2	6,8	7	7,4	11,2	8,8	8,4	8,6	7,4	5
Magnésium (mg/l)	3,8	4,6	3,4	4,6	3,8	4,4	3,7	5	4,3	7,2	5,6	4,4	3,7
Sodium (mg/l)	9	12,3	10,75	13,8	12,5	13,6	14,1	12,5	12,5	14,85	13,80	13,75	14,4
Potassium (mg/l)	2,1	2,5	1,15	0,5	2,3	2,45	2	2,5	2,5	2,48	3,25	2,70	2,50
Conductivité ($\times 10^{-6}$ mho/cm)	108,6	116,6	104,1	118,5	107	117,6	118,2	127	125,5	126,2	123,1	125,6	114,6
Alcalinité (mg/l CO_3Ca)	35,34	27,49	33,20	28,20	29,99	15,17	37,84	37,13	41,05	32,9	34,96	39,80	23,56
pH (unités pH)										8,2			

TABLEAU 7

Dosages et mesures au point 4 en surface
(Pont de Virey)

	O 1960	J 1961	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Température (°C)		7	10	8,5	13	14,5	16	17	15,5	16	9	6	
Oxygène (mg/l)	8,8	11,9	12,9		13,3	12,2	7,6	8,4		6	9,4	9,9	
Fer (mg/l)	4,5	0,14	4,82	0,314	0,63	0,38	0,23		0,314	0,38	0,66	0,5	traces
Azote nitrique (mg/l)	0,97	1,12	0,54	1,36	1,12	1,06	1,22	0,72	1,4	0,96	0,84	0,96	1,33
Azote ammoniacal (mg/l)	0,23	0,36	0,05	0,05	0,23	traces	0,05	0,10	0,13	0,75	0,175	traces	traces
Azote total dosé (mg/l)	1,20	1,48	0,59	1,41	1,35	1,06	1,27	0,82	1,53	1,71	1,011	0,96	1,33
Phosphore (mg/l)	traces	traces	0,003	traces	0,003	0,016	0,009	0,016	0,034	0,076	0,02	0,006	0,009
Oxydabilité (mg/l O_2)	5,54	2,1	9,04	2,94	3,48	2,56	1,8	3,98	2,27	2,53	6,60	3,70	2,42
Résidu sec (mg/l)	105	80	90	97,5	112,5	90	67,5	105	145	85	112,5	105	62,5
Chlore (mg/l)	18,5	19,6	17,6	17,8	19,2	19,6	19,6	19,4	22,6	19,8	19,3	21,2	23
Calcium (mg/l)	19,6	5,6	8,4	9	9	7	7,2	10,6	8	7,2	7	7,4	6
Magnésium (mg/l)	6,2	4,6	4,8	3,6	4,4	4,4	3,7	4,7	4,7	7,2	6,4	4,6	3,1
Sodium (mg/l)	9,5	13	9,1	12	14	13,6	15,6	12	13,6	15,7	13,25	13,45	13,8
Potassium (mg/l)	2,5	1,5	3,7	1	1,32	2,45	1,75	2,5	2,5	2,68	3,42	2,56	2,59
Conductivité (× 10^{-6} mho/cm)	130,7	113,4	98,1	110,9	113,4	117,6	119,7	128	119,1	122,5	123,8	120,1	110,1
Alcalinité (mg/l Co_3Ca)	48,55	28,56	34,81	27,85	30,70	15,17	35,34	40,34	44,98	30,88	35,34	39,45	23,20
pH (unités pH)										6,5			

barrage ; l'écoulement, qu'il faut assurer pour maintenir le niveau, est devenu égal, aux évaporations près, aux apports et superficiel. Nous avons trouvé la courbe qui s'établirait normalement dans un lac de profondeur un peu plus faible que celle du barrage plein, subissant les mêmes actions externes de par sa localisation géographique et possédant la même forme de bassin. Les différences, entre les courbes relevées alors et celles correspondantes de 1961, sont minimes. Les prises d'eau, à la cote ou elles sont situées, n'apportent donc guère de perturbations dans le comportement thermique de ce lac de barrage. Les eaux ont été ramenées à leur cote supérieure, 60 mètres, en octobre 1962.

TABLEAU 8

Compléments d'analyses

	Octobre 1960 Ruisseau affluent de Vézins	Janvier 1961 Ruisseau affluent des Biards	Janvier 1962 Dans Bras du Lac vers Hamelin
Température (°C)	—	8	6
Oxygène (mg/l)	—	—	—
Fer (mg/l)	5,00	0,21	0,034
Azote nitrique (mg/l)	0,60	1,10	0,05
Azote ammoniacal (mg/l)	0,43	0,30	0,30
Azote total dosé (mg/l)	1,03	1,40	0,35
Phosphore (mg/l)	traces	traces	0,03
Oxydabilité (mg/l O_2)	9,22	1,8	2,35
Résidu sec (mg/l)	87,5	90	102,5
Chlore (mg/l)	14	20,8	21,4
Calcium (mg/l)	12,4	5,8	6,4
Magnésium (mg/l)	3,2	5,4	4,3
Sodium (mg/l)	8	13,50	13,25
Potassium (mg/l)	2,5	2,3	2,3
Conductivité ($\times 10^{-6}$ mho/cm)	99,7	122,5	116,9
Alcalinité (mg/l CO_3Ca)	13,3	9,9	9,6

L'hiver 1962-1963 a été anormalement rigoureux et le lac a gelé en surface. Les riverains, questionnés, ne se souviennent que d'un seul gel précédent du lac, probablement en 1941. En 1963, les mesures ont été reprises en mars, trois jours après le dégel du lac consécutif à une tempête. L'année a été froide et humide, le temps n'a été que relativement chaud pendant le mois de juillet et en fin d'année, à partir de novembre, où les températures de l'air ont été au-dessus de la moyenne générale pour cette époque.

La première mesure de 1963 montre une faible stratification inverse ; en fait le lac doit être en circulation totale lente, le vent a été particulièrement violent les jours précédents et n'était pas calmé au moment de la mesure. En avril, la courbe relevée est assez régulière et un thermocline est déjà très bien marqué vers 13,5 mètres de profondeur. La précocité de l'établissement de la stratification, en 1963, est due à la grande différence verticale de température, avec une très faible valeur sur le fond ; les eaux du fond étant aussi plus difficiles à réchauffer, il s'ensuit une stabilité croissante puisque l'écart tend à augmenter.

Pendant 1963, le réchauffement du fond montrera chaque mois un retard par rapport aux années précédentes, on peut considérer que ce réchauffement n'est dû, qu'aux calories issues des roches sous-jacentes. On constate qu'après un hiver particulièrement rigoureux, il faut, au minimum, un an pour que les conditions thermiques soient revenues, dans l'hypolimnion, les mêmes que dans les années moyennes.

TABLEAU 9

Températures, pH et rH au point 1, en 1962

Surface	Mars (13)			Juin (13)			Septembre (11)			Décembre (26)		
	T	pH	rH	T	pH	rH	T	pH	rH	T	pH	rH
Surface	5,30	7,70	27,7	21,20	8,30	30,0	18,40	8,60	27,6	5,50	6,00	32,0
0,50	—	—	—	21,20	—	—	18,20	—	—	5,55	—	—
1 m	5,20	7,70	27,6	21,10	8,30	30,0	17,95	—	—	↑	6,25	33,0
2	↑	7,70	27,5	18,85	8,40	30,2	17,90	—	—		6,40	34,0
3		7,60	27,4	17,60	8,20	30,4	17,80	—	—		6,40	34,2
4		7,60	27,4	16,55	7,80	29,7	17,50	—	—		6,50	34,6
5	↓	7,55	27,4	14,85	7,45	29,4	17,45	8,00	26,0		6,50	34,6
6	5,15	7,55	27,4	14,15	7,30	29,4	17,20	—	—		6,50	34,8
7	5,15	7,50	27,4	13,65	7,20	29,4	17,00	—	—		6,50	35,0
8	5,10	7,50	27,3	13,10	7,20	29,4	16,80	—	—		6,55	35,2
9	5,10	7,50	27,3	12,50	7,15	29,4	16,55	—	—		6,60	35,3
10	5,05	7,50	27,3	12,25	7,10	29,4	16,15	7,10	24,0		6,65	35,5
11	5,00	7,50	27,3	11,75	7,05	29,4	15,40	—	—		6,65	35,6
12	5,95	7,50	27,3	10,80	7,05	29,5	13,80	—	—		6,65	35,6
13	4,90	7,50	27,4	9,75	7,00	29,5	11,90	—	—		6,60	35,8
14	4,80	7,50	27,4	9,10	7,00	29,6	10,50	—	—		6,60	35,8
15	4,70	7,50	27,4	8,80	7,00	29,6	9,70	7,00	23,0		6,65	35,8
16	4,70	7,50	27,4	8,65	7,00	29,6	9,25	—	—		6,60	36,0
17	4,70	7,50	27,4	8,50	7,00	29,6	9,00	—	—		6,60	36,1
18	4,65	7,50	27,3	8,25	7,00	29,7	8,75	—	—		6,60	36,3
19	4,55	7,50	27,3	8,00	7,00	29,6	8,50	—	—		6,60	36,3
20	4,50	7,50	27,3	8,00	7,05	29,4	8,35	6,85	22,7		6,60	36,4
21	↑	7,50	27,3	7,80	7,05	28,8	8,15	—	—		6,60	36,4
22		7,50	27,3	7,65	7,10	28,0	8,05	—	—	↓	6,60	36,6
23		7,50	27,3	7,55	7,15	23,8	7,90	—	—	5,40	6,65	36,6
24		7,50	27,3	7,45	7,15	24,2	7,85	—	—	5,20	6,60	36 8
25		7,50	27,2	7,45	7,10	24,0	7,85	7,40	23,2	5,15	6,65	36,8
26		7,50	27,2							5,15	6,70	37,0
27		7,45	27,3							5,00	6,65	36,9
28		7,45	27,3							5,00	6,60	36,8
29	↓	7,50	27,3							5,05	6,60	36,9
30	4,40	7,50	25,9							5,50	6,80	36,3

Il n'y a pas de raison pour douter que ceci n'entraîne des différences dans la formation des varves correspondantes. La stabilité des couches d'eau du lac, en 1963, a été assez grande pour que toutes les variations de la température aient été d'une régularité presque parfaite, donnant des courbes qui sont presque des courbes théoriques.

L'examen des températures superficielles (tabl. 13) montre le phénomène, déjà noté en 1961, de l'augmentation de ces températures de l'amont vers l'aval du lac ; la seule exception est en mars 1963, aussitôt après le dégel. On constate aussi

TA

Températures, pH et

	Mars (12)	Avril (29)			Mai (29)			Juin (24)	Juillet (26)			
	T° °C	T	pH	rH	T	pH	rH	T *	T	pH	rH	T
Surface	3,40	13,40	6,70	33,0	16,90	8,50	33,0	19,00	22,05	9,30	32,0	16,95
0,50	↑	13,30	—	—	—	—	—	—	22,00	—	—	16,90
1 m		13,25	6,80	33,9	16,95	7,20	34,2	18,80	21,05	9,35	32,0	16,80
2		12,80	6,80	33,9	16,90	7,50	34,6	17,85	19,80	9,30	31,7	16,75
3		12,75	6,80	33,8	15,95	7,40	34,7	—	19,20	9,00	29,6	16,75
4		12,70	7,00	33,4	14,85	7,15	34,7	—	19,05	8,60	31,0	16,75
5		12,55	6,55	34,1	14,35	6,90	34,2	17,55	18,90	8,30	30,6	16,70
6		12,05	6,50	34,2	14,10	6,75	34,4	—	17,45	7,20	28,6	16,70
7		12,00	6,40	34,1	13,80	6,70	34,4	15,70	16,70	6,70	27,8	16,70
8		11,80	6,40	34,2	13,45	6,60	34,7	—	16,30	6,65	27,8	16,65
9		11,65	6,35	34,2	13,15	6,70	34,5	—	15,80	6,55	27,6	16,20
10		11,45	6,40	34,2	12,95	6,50	34,6	14,65	15,45	6,50	27,0	15,90
11		10,90	6,40	34,5	12,50	6,50	34,6	—	14,90	6,40	26,3	15,30
12		10,50	6,40	34,6	11,90	6,45	34,5	—	13,85	6,40	11,6	15,05
13		9,65	6,40	34,6	11,25	6,30	34,6	—	12,00	6,30	10,5	14,80
14		8,55	6,40	35,0	10,50	6,20	34,6	—	10,20	6,25	9,8	13,50
15		7,90	6,50	35,2	9,70	6,20	34,6	11,30	9,30	6,25	7,4	11,45
16		7,50	6,50	35,4	8,90	6,20	34,6	—	8,60	6,15	6,6	10,50
17		7,15	6,40	35,4	7,90	6,20	34,9	—	8,15	6,20	8,0	9,55
18		6,95	6,45	35,5	7,40	6,10	34,9	—	7,85	6,15	12,8	8,85
19	↓	6,55	6,40	35,4	7,10	6,10	34,9	—	7,45	6,15	27,0	8,35
20	3,60	6,45	5,40	34,0	6,80	6,15	35,2	7,30	7,15	6,20	7,0	7,90
21	↑	6,45	3,05	28,8	6,70	6,00	35,2	—	6,95	6,20	7,2	7,60
22		6,45	3,50	29,8	6,50	6,00	35,2	—	6,75	6,20	6,0	7,35
23		5,90	3,80	30,4	6,40	6,00	35,2	—	6,50	6,25	5,2	7,10
24		5,80	5,20	33,8	6,35	6,00	35,0	—	6,50	6,30	4,8	6,90
25		5,80	5,85	35,0	6,15	6,10	35,0	6,30	6,40	6,35	4,2	6,75
26		5,80	6,00	34,8	6,15	6,10	35,0	—	6,40	6,35	3,6	6,65
27		5,70	6,50	35,3	6,10	6,10	35,0	—	6,40	6,40	3,5	6,60
27,50		5,70	7,70	33,0	—	—	—	—	6,40	—	—	6,60
28					6,10	6,15	32,6	—	6,40 à	6,50	3,5	6,60
	↓								28,20 m			6,60
28,50	3,70							—	6,40	6,85	4,0	6,60
29								—				6,60
												29,10
29,50								—				
30								6,20				

* En juin 1963, températures corrigées (voir texte)

IO

oint 1, en 1963

22)		Septembre (26)			Octobre (31)			Novembre (2–12)			Décembre (31)		
H	rH	T	pH	rH	T	pH	rH	T	pH	rH	T	pH	rH
15	32,3	15,90	7,15	29,2	12,70	7,80	36,0	9,05	9,00	36,3	4,10	6,85	31,9
—	—	15,90	—	—	12,75	7,50	34,0	↑	—	—	4,05	—	—
15	32,2	15,85	7,05	29,4	12,80	7,80	34,8		8,25	35,2	4,00	5,40	28,8
06	32,4	15,85	7,10	29,4	12,75	7,95	35,2		7,90	34,7	↑	5,75	30,0
00	32,2	15,80	7,10	29,6	12,80	7,95	35,2		7,65	34,4		6,05	31,0
95	32,4	15,80	7,10	29,7	12,80	7,90	35,2		7,50	34,2		6,30	31,5
95	32,4	15,65	7,10	29,8	12,80	7,85	35,2		7,40	↑		6,35	31,8
95	32,4	15,60	7,00	29,8	12,80	7,85	35,4		7,35			6,45	32,0
20	32,7	15,50	6,90	29,8	12,80	7,85	35,5		7,25			6,50	32,3
80	32,4	15,35	6,75	29,5	12,80	7,85	35,6	↓	7,20			6,55	32,5
65	32,2	15,30	6,75	29,6	12,75	7,90	35,6	9,00	7,25			6,60	32,5
55	32,0	15,05	6,70	29,8	12,80	7,90	35,7	↑	7,20	↓		6,60	32,9
50	31,9	14,95	6,70	29,8	12,75	7,80	35,5		7,25	34,4		6,65	33,2
50	32,1	14,65	6,70	30,0	12,55	7,75	35,5		7,25	34,4		6,70	33,2
50	31,8	14,10	6,75	30,1	12,40	7,70	35,5	↓	7,20	34,4		6,70	33,3
40	31,6	13,15	6,70	30,1	11,85	7,70	35,6	8,95	7,20	34,5		6,70	33,3
30	31,2	11,30	6,60	29,6	10,40	7,60	35,4	8,80	7,20	↑		6,70	33,5
30	31,2	9,45	6,55	28,8	9,40	7,40	34,9	8,75	7,20			6,75	33,7
30	30,8	8,80	6,45	28,4	8,60	7,35	34,6	8,65	7,15			6,75	33,6
25	30,6	8,40	6,40	28,2	8,25	7,30	34,4	8,65	7,15	↓		6,80	33,7
20	30,2	8,10	6,40	27,9	8,00	7,30	34,2	8,60	7,15	34,6		6,80	34,0
20	30,1	7,80	6,40	27,8	7,75	7,25	34,1	8,55	7,10	34,6		6,85	34,0
25	29,9	7,60	6,40	27,4	7,40	7,25	34,0	8,05	7,00	34,4		6,80	33,9
20	29,8	7,40	6,40	27,0	7,30	7,25	33,9	7,90	7,00	34,2		6,85	34,0
20	29,7	7,25	6,40	26,9	7,20	7,30	33,9	7,70	6,95	33,9		6,90	34,2
20	29,5	7,10	6,40	26,6	7,20	7,35	32,4	7,55	6,90	33,7		6,90	34,2
25	29,6	6,95	6,40	26,6	7,20	7,40	28,9	7,40	6,90	29,8		6,95	34,3
30	29,4	6,85	6,40	26,4	7,20	7,65	26,9	7,30	7,00	26,7		7,00	34,3
30	29,3	6,80	6,45	26,3	7,05	8,00	25,4	7,25	7,20	24,9		7,00	34,4
—	—	—	—	—	7,05	8,15	22,7	7,25	7,20	24,9		—	—
30	28,1	6,80	6,80	22,6				7,25	7,20	24,9		7,00	34,4
—	—	—	—	—				7,15	7,95	23,8	↓ 4,00	—	—
00	25,8	6,80	7,05	20,6							4,55	7,05	34,8
		—	—	—									
		6,80	7,90	21,2									

TABLEAU II

Saturations en oxygène — Pourcentages calculés

	O 1960		J 1961	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
PONT DE VIREY — Point 4														
	—		101	118	—	130	123	79	89	—	62	86	82	—
PONT DE LA RÉPUBLIQUE — Point 3														
	—		97	118	—	124	140	147	130	—	152	58	69	—
PONT DES BIARDS — Point 2														
Surface	74		99	121	—	139	187	149	201	—	110	61	58	—
Milieu	—		96	116	—	115	141	92	75	—	5	59	56	—
Fond	—		92	107	—	67	109	37	56	0	2	55	63	—
BARRAGE — Point 1														
Surface	76	Surface	—	112	—	175	164	176	168	104	117	62	54	80
— 5	68	— 5,5	—	91	—	113	153	155	120	51	22	60	—	—
— 10	70	— 11	—	113	—	123	109	102	105	3	2	48	—	—
15	64	— 16,5	—	67	—	92	91	71	75	2	1	2	—	—
20	3	— 22	—	111	—	83	70	78	75	0	1	0	—	—
25	0	Fond	—	84	—	54	80	42	42	0	0	0	—	22
Fond	0													

TABLEAU 12

Calcul du pourcentage de carbonates en 1960-1961

	0 (60)	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Octo.	Nov.	Déc.
						Pont de Virey							
Conductivité totale	130,7	113,4	98,1	110,9	113,4	117,6	119,6	128	119,1	122,5	123,8	120,1	110,1
Conduct. équivalente	92	48,5	59	48	52	26	60	68	76	52,5	60	67,5	40
% de carbonates	62,7	42,7	60,1	43,2	45,8	22,1	40,1	53,1	63,8	42,8	48,4	56,2	36,3
						Pont de la République							
Conductivité totale	108,6	116,6	104,1	118,5	107	117,6	118,2	127	125,5	126,2	123,1	125,6	114,6
Conduct. équivalente	60	47	56	48	51	27	64	62,5	69,5	55	59,5	67,5	40
% de carbonates	55,2	40,3	53,7	40,5	47,6	22,9	54,1	49,5	55,3	43,6	48,3	53,7	34,9
						Pont des Biards							
Conductivité totale	108,6	115,6	110,6	115,7	114,5	107	110,1	123	123,7	122,1	124,9	126,7	121,8
Conduct. équivalente	61	46	51,5	46,5	54	32,5	60	64,5	75	53	57	70	40
% de carbonates	56,1	39,8	46,5	40,2	47,1	30,3	54,5	52,4	60,6	43,4	45,6	55,2	32,8
Conductivité totale		115,7	109,8	115,6	107,3	113,4	116,6	124	125,2	125,5	124,9	128,1	
Conduct. équivalente		45	52	51	58	34	61	60	72	51,1	61	67	
% de carbonates		38,9	47,3	44,1	54	30	52,3	48,4	57,5	41	48,8	52,3	
Conductivité totale		117,3	120,8	116,6	109,4	112,5	128,8	146	141,5	127,7	125,8	140,4	
Conduct. équivalente		47	59	48	56,5	36	82	75,5	88	55	66,5	65,5	
% de carbonates		40	48,8	41,1	51,6	32	53,6	51,7	62,2	43,1	52	46,6	

TABLEAU 12 *Suite*

Barrage													
Conductivité totale	111,9	116,8	114,2	115,4	114,8	109,3	112,1	123	148,8	122,2	123,1	133,4	124,5
Conduct. équivalente	71	45,5	42	45,5	54,5	28,5	60,5	63,5	83	51,5	65	63,5	46,5
% de carbonates	63,4	38,9	36,8	39,44	447,4	26,1	54	51,6	55,8	42,1	52,8	47,6	37,3
Conductivité totale	105,3	116,8	117,3	116,8	115	111,2	115,6	120	125,2	122,7	125,4		124,8
Conduct. équivalente	59	48,5	46,5	51	56,5	28	63,5	62	62	51	64		41,5
% de carbonates	56	41,9	39,6	43,6	49,1	25,2	54,9	51,7	49,5	41,5	51		33,2
Conductivité totale	107,3	117,3	115,6	122,1	118,1	112,7	118,3	127	133,1	124,3	129,7		127,6
Conduct. équivalente	54,5	48,5	48,5	54,5	53,5	31,5	60,5	63	64,5	54	61		42,5
% de carbonaets	50,8	41,3	41,9	44,6	45,3	27,9	51,1	49,6	48,4	43,4	47		33,3
Conductivité totale	107,3	117	108,3	115,5	118,1	112,6	110,7	113	127	114,7	142,2		113,2
Conduct. équivalente	51	47	48	46	49,5	28	62	60,5	74	52	×		57
% de carbonates	47,5	40,2	44,3	39,8	41,9	24,8	56	53,5	58,3	45,3	×		50,3
Conductivité totale	119,6	116,8	115	116,8	116,2	114,9	116,5	119	122,8	128,8	150,1		111,6
Conduct. équivalente	60,5	52,5	45,5	53	51	24,5	65	56,5	69	73	×		41,5
% de carbonates	50,6	44,9	39,5	45,4	43,9	21,3	55,8	47,5	56,2	56,7	×		37,2
Conductivité totale	141,7	116,8	110	117,1	120	122,7	188,6	134	149,1	164,6	177,6		111,9
Conduct. équivalente	91	49	49,5	58	60	36,5	×	88	×	×	×		42
% de carbonates	64,2	41,9	45	49,5	50	29,7	×	65,7	×	×	×		37,5
Conductivité totale	181												
Conduct. équivalente	99,5												
% de carbonate1	55												
Pont de Vézins													
Conductivité totale	108,3	115,9	117,2	115	115,4	94,3	99,7	121	127,3	120,8	126,9	139,8	116,5
Conduct. équivalente	68	46,5	44	50,5	50,5	31	59,5	62	69	50,5	61,5	67	41
% de carbonates	62,8	40,1	37,5	43,9	43,7	32,9	59,7	51,2	54,2	41,8	48,5	47,9	35,2

que, pendant les mois les plus chauds, la température au point 1, au niveau des prises d'eau, est supérieure à celle de la Sélune à l'entrée du lac. La retenue de Vézins entraîne donc un réchauffement estival du cours de la rivière immédiatement en aval, ce phénomène est intéressant à connaître en raison de ses rapports avec la biologie des salmonidés.

Conclusion à l'étude des facteurs thermiques

En tenant compte du fait que le gel du lac, observé en 1963 est un phénomène qui ne survient que rarement, plus de 20 ans entre les gels connus, nous devons classer le lac de Vézins en fonction de son comportement habituel.

En suivant la terminologie de FOREL (1895) et en admettant que l'hiver 1962-63 ait été anormalement dur dans la région, nous devons le placer dans le groupe des lacs tropicaux : une seule période de circulation en hiver. En principe, la surface ne gèle pas et l'eau n'est jamais plus froide que 4°. Nous remarquons, en effet, qu'il ne suffit pas toujours que l'eau se refroidisse en-dessous de 4° pour qu'une véritable stratification inversée s'établisse, encore faut-il une baisse allant jusqu'au gel et que ce phénomène dure un temps très appréciable. D'autre part, il est connu depuis longtemps que les meilleurs exemples de lacs tropicaux, selon FOREL, se rencontrent dans l'ouest de l'Écosse. Aussi, pour améliorer la classification, plusieurs systèmes ont-ils été proposés depuis. FOREL ne reconnaissait que trois types de lacs d'après leurs propriétés thermiques, les nouvelles subdivisions ont augmenté ce nombre

D'après YOSHIMURA (1936), nous le classerons dans la catégorie des lacs subtropicaux : température superficielle jamais en-dessous de 4°, grandes variations annuelles, gradient thermique important, une période de circulation en hiver. C'est, d'ailleurs, dans cette catégorie de YOSHIMURA que se placent automatiquement la presque totalité des lacs topicaux de FOREL. Une autre conception a remplacé les noms des catégories précédentes par des termes qui définissent beaucoup mieux, à eux seuls, le régime des lacs désignés, sans présager de leur situation géographique probable comme on peut être tenté de le faire, souvent incorrectement, avec les distinctions primitives. Ensuite, HUTCHINSON et LÖFFLER (1956) ont ajouté des catégories où entrent certains lacs très particuliers, mais en employant la même terminologie. Vézins devient alors un lac tiède à une seule période de circulation annuelle, *warm monomictic* ; c'est très exactement le groupe des lacs subtropicaux de YOSHIMURA.

Si nous cherchons des points de comparaison, nous trouvons des lacs naturels du même type en Écosse, dans le district des lacs anglais et en Irlande. En France, les lacs du Massif central semblent tous avoir deux périodes de circulation séparées par deux stagnations (lacs dimictiques) ; c'est le cas de tous les lacs pyrénéens et alpins français. Même le Léman, avec une température minimale de 3,9° aurait, d'après HUTCHINSON [99] (1957), deux périodes de circulation ; en revanche, B. DUSSART [54] (1963) le qualifie de lac monomictique chaud, ce qui le rapproche de celui de Vézins. Personnellement, je me range à cette deuxième affirmation, son auteur ayant spécialement étudié ce lac du point de vue thermique.

Sur le versant sud des Alpes, et plus au sud, nous retrouvons des lacs monomictiques. Il est probable que le lac de Guerlédan, en Bretagne, est du même type que celui de Vézins, bien que plus éloigné de la côte, mais les données que je possède à son sujet sont très incomplètes.

Nous avons, aussi, pu constater que les perturbations introduites dans le régime thermique moyen d'un lac par un froid exceptionnel étaient susceptibles de se poursuivre sur plus d'une année, c'est-à-dire, de modifier au moins deux cycles successifs.

Le lac de Vézins se stratifie parfaitement en été et le thermocline s'établit au barrage vers 13 mètres de profondeur, ce qui correspond sensiblement à la cote inférieure des prises d'eau, mais n'est pas éloigné, non plus, de la profondeur à laquelle s'établirait le thermocline si le lac était un lac naturel avec effluent superficiel.

TA

Fer, Manganèse, Sulfates, Sulf

Points	Fer (mg/l)					Manganèse (mg/l)					
	1 S	1 F	2	3	4	1 S	1 F	2	3	4	1 S
Mars	—	—	—	0,95	0,95	—	—	—	—	—	—
Avril	tr.	—	tr.	tr.	tr.	0	—	0	0	0	tr.
Mai	tr.	—	tr.	tr.	tr.	0	—	0	0	0	0
Juin	0	tr.	0	0	0	0	tr.	0	0	0	0
Juillet	0	1,1	0	0	tr.	0	tr.	0	0	0	—
Août	0,35	3,2	0,24	0,40	0,59	0	0,16	0	0	0	2,8
Septembre	0,43	31,4	0,35	0,78	0,68	0	0,88	0	0	0	4,1
Octobre	0,49	37,2	0,57	0,68	0,57	0	1,54	0	0	0	4,6
Novembre	0,59	18,6	0,62	0,68	—	0	1,48	0	0	—	3,2
Décembre	0,47	1,03	0,31	0,62	0,59	0	tr	0	0	0	3,4

— : non dosé.
0 : absence (dans les limites de détection).
tr : traces (mais non dosable).

c) Facteurs chimiques

Les dosages chimiques ont été effectués sur de l'eau prélevée à une profondeur connue, à l'aide d'une bouteille de Friedinger (Lucerne, Suisse) qui donne techniquement toute satisfaction pour les études de limnologie ; en particulier, le dosage des gaz dissous peut être mené avec le maximum de précision.

1. *L'oxygène*

L'oxygène a été déterminé par la méthode classique et universellement adoptée de Winkler (cependant, comme des nombreuses variantes sont fréquemment utilisées, je crois devoir donner les grandes lignes du procédé employé). L'eau qui s'écoule de la bouteille à prélèvement est conduite par un petit tube au fond d'un

flacon, à bouchon émeri, de 125 ml ; le remplissage se fait ainsi doucement et sans barbotage. Lorsque le flacon est plein, on laisse couler encore un volume équivalent avant de le boucher. Les solutions iodées et de chlorure de manganèse sont introduites délicatement près du fond à l'aide de pipettes 2 traits et, ensuite, après agitation, la solution acide est versée sur la surface du liquide. A ce stade, il est possible de différer quelque temps la suite du dosage, mais dans la mesure du possible nous terminions celui-ci dès la fin de la série des prélèvements, en employant une solution d'hypo-

13

pérature et Transparence, en 1963

SO_4 mg/l				S des Sulfures (mg/l)	Températures					Transparence (mètres)	T° de l'air
F	2	3	4	1 F	1 S	1 F	2	3	4	1	1
—	—	—	—	—	3,4	3,7	—	6,6	6,0	1,20	7,5
—	tr.	tr.	tr.	—	13,4	5,7	12,5	11,5	11,5	1,45	15
—	0	0	0	—	16,9	6,1	17,5	17,0	14,5	2,50	13
0	0	0	0	—	19,0	—	19,5	19,5	14,5	2,20	20
	—	—	—	—	22,05	6,4	22,0	21,0	16,0	1,60	21
2,6	2,4	3,0	3,0	—	16,95	6,60	17,0	17,0	14,5	1,60	—
0	3,2	3,2	3,2	0,77	15,90	6,80	15,0	17,0	14,0	1,70	17
3,0	4,3	3,7	4,6	1,02	12,70	7,05	9,0	12,0	—	2,90	12
3,7	2,6	3,7	—	0,89	9,05	7,15	8,5	8,0	—	1,40	12
0,4	3,4	3,4	3,4	0,25	4,10	4,55	5,5	3,0	6,0	2,30	5

sulfite de titre connu. J'ai également utilisé, à plusieurs reprises, une seringue en plexiglass, modification de la seringue de Krogh et qui avait été précédemment construite sur les indications de A. Wurtz. Sa faible contenance, 25 ml, et les faibles volumes de solutions nécessaires alors pour le dosage, amènent une réduction de l'encombrement du matériel à transporter pour ce travail, ce qui n'est pas sans intérêt. Cependant, la matière première utilisée semble sujette à une certaine déformation, faible et lente, mais suffisante pour amener parfois un mauvais fonctionnement de l'appareil.

L'oxygène est moyennement soluble dans l'eau, sa solubilité dépendant de sa pression partielle dans la phase gazeuse et diminuant avec l'élévation de la température. La première condition se ramène à la pression atmosphérique ; puisque la proportion d'oxygène dans l'air est remarquablement constante et les échanges gazeux étant relativement lents dans une grande masse d'eau peu agitée, c'est la pression

atmosphérique moyenne du lieu de l'étude, dépendant directement de son altitude, qui aura le plus d'importance pour cette condition.

Il est donc possible de dresser des tableaux de saturation moyenne de l'eau en oxygène, suivant la température de l'eau, et de prévoir un coefficient de correction dépendant directement de l'altitude du lieu de l'étude. Dans la pratique, les eaux naturelles rencontrées peuvent, de ce point de vue, être saturées, sous-saturées ou sur-saturées en oxygène, ces deux derniers cas créés d'une façon générale par action biologique.

Pour l'estimation du pourcentage de la saturation en oxygène à Vézins, j'ai tracé une abaque d'après les valeurs de saturation publiées par TRUESDALE, DOWNING et LOWDEN (1955) qui sont considérées, actuellement, comme les plus précises. L'altitude de Vézins est telle que la correction peut être négligée et le lac considéré pratiquement comme au niveau de la mer.

Si nous examinons les variations annuelles de l'oxygène à Vézins (tabl. 3 à 8 et 11), nous pouvons constater en 1961, qu'au point 4, à l'entrée de la Sélune dans le lac, à partir de juin, les eaux sont nettement sous-saturées en oxygène, phénomène dû à la pollution de la rivière et de son affluent l'Airon au niveau de la ville de Saint-Hilaire-du-Harcouët. Cette pollution, de type organique, entraîne un abaissement du taux d'oxygène par fermentation et se développe avec l'élévation de la température de l'eau. La dégradation du milieu se retrouve, d'ailleurs, nettement mise en évidence dans le plancton du lac au point 3 et quelquefois plus loin en aval, surtout par la composition totale du phytoplancton et la présence, presque constante, de la bactérie *Sphaerotilus natans*, très caractéristique à cet égard.

Au point 3, la sursaturation persiste jusqu'en septembre, en raison de l'abondant phytoplancton qui s'y développe. En octobre, nous ne trouvons que 6,2 mg/l d'oxygène ; cette baisse correspond à la décroissance du plancton et à sa modification.

Au point 2, pont des Biards, en surface, la sursaturation est encore de règle jusqu'en septembre, suivie par une sous-saturation ; mais, pendant la belle saison, nous enregistrons deux maximums, 17 mg/l en mai et 17,1 mg/l en juillet, action sursaturante en oxygène d'un phytoplancton nettement lacustre s'exerçant sur des eaux en grande partie purifiées et déjà enrichies en oxygène en amont. Nous constatons qu'en profondeur, la quantité d'oxygène disponible diminue toujours, avec une exception en novembre où on note une légère augmentation de la quantité d'oxygène existant sur le fond. En début d'année, la teneur est peu différente entre la surface et le fond et très voisine de la saturation puis, progressivement, le fond s'appauvrit et la teneur s'établit en dessous de la saturation. Le premier maximum de mai se retrouve au fond et ramène la teneur au-dessus de la saturation, mais la stratification thermique qui s'établit freine les échanges verticaux, le fond s'appauvrit de nouveau très vite ; le deuxième maximum de juillet en surface ne parvient pas à ramener le fond au-dessus de la saturation et le mois suivant, août, nous trouvons 0,00 mg/l d'oxygène et seulement 0,2 mg/l en septembre. A partir d'octobre, la sous-saturation est pratiquement la même dans toute la masse d'eau qui semble s'être homogénéisée au point de vue de la teneur en oxygène, alors que les courbes de température montrent un thermocline net, mais une faible différence verticale de température qui n'est probablement due qu'à l'action de l'échauffement diurne.

Au point 1, barrage, en surface, les eaux sont sursaturées en oxygène jusqu'en septembre, mais le maximum est enregistré dès avril et dure pratiquement jusqu'en

juillet bien que, ce mois-là, la teneur soit redescendue à 168 p. 100 de la saturation alors qu'elle était à 175 p. 100 en avril. Exprimée en mg/l, la diminution est plus sensible : 14 mg/l en juillet pour 17,3 en avril. Dès que la stratification thermique atteint une importance suffisante, la teneur diminue régulièrement avec l'augmentation de la profondeur et, pratiquement, l'eau n'est qu'exceptionnellement saturée en oxygène à partir de 15 mètres. Pendant les mois d'hiver, les variations verticales sont très irrégulières, mais ne sont jamais très éloignées de la saturation. Ensuite, tandis que le développement massif du phytoplancton produit le maximum signalé en surface, les eaux du fond s'appauvrissent progressivement ; le minimum s'établit en août, septembre et octobre avec 0,00 mg/l au fond et des teneurs très faibles dès 10 m en août et septembre, et seulement 15 m en octobre, puis l'homogénéisation des eaux se fait sentir et les teneurs se rapprochent toutes de la saturation en fin d'année.

De ces teneurs et saturations en oxygène, nous pouvons déjà dire que le lac de Vézins est un lac eutrophe, devant présenter une productivité primaire élevée d'après les pourcentages de saturation extrêmes relevés (maximum [187 p. 100), ce qui se confirme, d'ailleurs, par la suite et ne doit pas surprendre puisque l'alimentation par les eaux de la Sélune est faite en eau polluée par substances organiques.

Le calcul du déficit relatif en oxygène dans l'hypolimnion (Ström, 1931) n'est possible qu'au point 1 : barrage ; en effet, ici seulement, la profondeur est suffisante pour se tenir dans les valeurs extrêmes permettant une précision suffisante pour que ce calcul soit représentatif et que des comparaisons soient permises (lacs de 20 à 75 m (Hutchinson, 1957 [99] p. 639).

En 1961, nous avons noté : stagnation d'avril à octobre et thermocline toujours situé à, ou au-dessus, de 16,50 m ; les deux valeurs pour 22 m et pour le fond sont donc celles toujours situées dans l'hypolimnion. Nous calculons leur moyenne arithmétique par mois (qui est, en février, une valeur très approchée de la saturation à la température existante).

Février .... $\frac{12,7 + 9,6}{2} = 11,15$ mg/l

Avril .... $\frac{9,5 + 6,2}{2} = 7,85$ mg/l

Mai .... $\frac{7,9 + 9,2}{2} = 8,55$ mg/l

Juin .... $\frac{8,8 + 4,8}{2} = 6,80$ mg/l

Juillet .... $\frac{8,5 + 6,4}{2} = 7,45$ mg/l

Août .... $\frac{0,00 + 00,0}{2} = 0,00$ mg/l

Septembre ..... $\frac{0,10 + 0,00}{2} = 0,05$ mg/l

Octobre .... $\frac{0,00 + 0,00}{2} = 0,00$ mg/l

Nous pouvons prendre la valeur de février (11,5 mg/l) comme valeur maximale atteinte pendant la période de circulation précédente et nous constatons ensuite qu'à partir d'avril, malgré de petites variations qui ne sont que le reflet adouci des variations superficielles, les teneurs baissent régulièrement et que tout l'oxygène de l'hypolimnion est consommé, par les processus biologiques et physico-chimiques dont il est le siège, dès le mois d'août, soit en une durée (obligatoirement fixée avec une certaine imprécision en l'absence de mesures journalières) allant du 1er avril à la fin d'août, de 150 jours, d'où nous tirons le déficit relatif qui est alors de 11,15/150 = 0,074 3 mg/l/jour.

Ne disposant pas d'une carte bathymétrique précise, je ne peux calculer le déficit hypolimnétique par unité de surface (Birge et Juday, Thienemann) ; la comparaison des deux résultats aurait été intéressante.

Conclusion :

L'oxygène disparaît totalement dans le fond du lac de Vézins pendant sa période annuelle unique de stagnation, qui est estivale. Ceci est le résultat d'un déficit relatif dans l'hypolimnion qui est de 0,074 3 mg/l/jour. Nous ne devons, cependant, pas oublier que le déficit trouvé n'est pas dû uniquement aux phénomènes qui se passent dans l'eau de l'hypolimnion, principalement décomposition bactérienne des substances organiques tombant de l'épilimnion et de la couche du saut, mais aussi à l'action directe de la vase du fond.

2. *L'alcalinité et les carbonates*

L'alcalinité se détermine avec de l'acide sulfurique de titre connu ; en opérant en présence d'hélianthine comme indicateur, on obtient la teneur de l'eau en alcalis libres, carbonates et bicarbonates. En utilisant de l'acide N/10 le volume V, en millilitres, d'acide versé, diminué de 0,1 ml, quantité nécessaire pour le virage de l'indicateur (2 gouttes à 1 p. 100), donne l'alcalinité en milliéquivalents. En multipliant cette alcalinité par 5, on obtient le titre alcalimétrique complet (T. A. C.) de l'eau, en degrés français (Rodier, 1960 [151]). En multipliant l'alcalinité, en mé./l,par 50,045, on trouve sa correspondance en mg/l de carbonate de chaux, et par 28,04 sa correspondance en mg/l de chaux exprimée en CaO. Les résultats sont souvent exprimés en carbonate de chaux (CO_3Ca) en France et dans les pays de langue anlaise, et en chaux en Allemagne ; le rapport $\frac{\text{mg/l CaO}}{\text{mg/l } CO_3Ca} = 1{,}785$ permet de passer d'une valeur à l'autre.

En 1961, nous constatons que, d'une façon générale, les eaux de Vézins sont toujours d'une alcalinité faible, puisque leur degré alcalimétrique maximal correspond, en surface, à 49,09 mg/l (en CO_3Ca) soit environ un T. A. C. de 1 mé. ou 5° alcalimétriques français (1 mé. de carbonate de calcium # 50 mg) et que le maximum absolu rencontré est de 58,90 mg/l, soit environ 6° alcalimétriques. Ceci est normal en raison de la nature des terrains drainés par la Sélune. Ces eaux sont, donc, des eaux très peu « dures » qui dissolvent bien le savon. Nous constatons que les courbes des variations superficielles au cours de l'année sont assez bien superposables en chaque point. En janvier, février, mars et avril, nous trouvons une alcalinité peu éloignée de 30 mg/l, puis un minimum net en mai, compris entre 15 et 20 mg/l. La

valeur remonte en juin, juillet et août pour atteindre le maximum annuel situé entre 40 et 50 mg/l, puis, en septembre, un nouveau minimum apparaît, mais dont la valeur se trouve vers 30 mg/l. Il y a une nouvelle remontée en octobre et novembre proche de 40 mg/l et, en décembre, nous retrouvons des valeurs légèrement inférieures ou égales à celles du début de l'année.

Au fond du lac, la courbe de variation annuelle reproduit les mêmes changements d'ensemble, mais avec des maximums beaucoup plus élevés qu'en surface. En comparant les courbes de l'alcalinité avec les autres dressées la même année, il apparaît que pour le fond, c'est-à-dire les eaux correspondant à l'hypolimnion pendant la stratification, les courbes de variation de l'alcalinité reproduisent bien, d'une façon exactement inverse, celles représentant la saturation en oxygène. A une alcalinité élevée correspond une très faible saturation en oxygène, ce qui ne doit pas nous étonner, d'ailleurs, puisqu'il est bien connu que l'alcalinité totale correspond toujours presque uniquement à des carbonates, principalement de calcium, d'où le choix de son expression en CO_3Ca ou en CaO. De plus, le carbonate de calcium n'est soluble que dans les eaux contenant de l'acide carbonique qui le solubilise à l'état de bicarbonate, le gaz carbonique des eaux naturelles provient surtout des actions biochimiques qui utilisent, pour le produire, un volume correspondant d'oxygène. Nous verrons, cependant, que, dans le cas présent, le carbonate de calcium n'est pas seul en cause.

Dans la pratique, on admet que l'alcalinité, mesurée suivant la méthode donnée ci-dessus, correspond, pour les eaux naturelles, effectivement à une teneur en bicarbonates, et dans ces conditions il est possible de déterminer la proportion de carbonates par rapport au contenu total en sels, en utilisant la mesure de la conductivité (Ruttner, 1952 [151]) : « La conductivité électrique du bicarbonate de calcium en solution est connue et, pour des concentrations allant jusqu'à une alcalinité de 5 (degrés allemands = 250 mg/l en CO_3Ca), peut être trouvée avec un graphique tracé d'après les valeurs suivantes :

Alcalinité en degrés allemands	Alcalinité en mg/l de CO_3Ca	Conductivité $\times 10^{-6}$ mho/cm/cm²
—	—	—
1	50	85
2	100	166
3	150	244
4	200	320
5	250	394

» Si la conductivité pour les carbonates, estimée ainsi d'après l'alcalinité, est comparée avec une mesure de la conductivité totale, la proportion de carbonates par rapport aux sels totaux peut être calculée avec assez d'exactitude car, en solution diluée, la conductivité électrique est directement proportionnelle à la concentration en substances dissoutes et peu différente avec les divers sels en considération. »

Nous pouvons donc établir le tableau de la proportion des carbonates dans les eaux de Vézins (tabl. 12). Son examen montre, en premier lieu, une teneur minimale de 21,3 p. 100 de carbonates en mai, à 22 mètres, au point 1, et une teneur maximale de 65,7 p. 100 au fond du lac, au point 1, en juillet. Il est probable, d'ailleurs, qu'au

même point, la teneur d'août, qui n'a pu être calculée, devait être supérieure. Ces proportions sont faibles, comparativement à celles rencontrées, en général, dans les eaux lacustres, mais ne sont pas anormales pour des eaux de faible alcalinité. Ainsi, ABERG et RODHE, en 1942, ont trouvé des valeurs de 16 p. 100 seulement, dans quelques lacs de Suède (RUTTNER [152] 1952).

Comme l'alcalinité, qui est en relation étroite avec elle, la teneur en carbonate de chaux dépend directement des conditions géologiques du bassin lacustre étudié. Les variations de l'alcalinité se superposant bien à celles de la conductivité, le pourcentage de carbonates, calculé d'après ces deux valeurs, se représente par des courbes ayant entre elles la même allure générale que nous retrouvons. Le maximum des carbonates correspond donc au minimum de l'oxygène, au moins dans l'hypolimnion ; ceci découle du cycle biologique des êtres vivants contenus dans l'eau. En début d'année, il y a relativement peu de vie dans le lac qui présente une composition chimique assez homogène, une teneur moyenne en gaz carbonique et en oxygène, le gaz carbonique réagissant en partie dans l'eau pour donner de l'acide carbonique et des carbonates. La température de l'air s'élevant, une stratification s'établit progressivement, tandis que l'on trouve un développement important du phytoplancton (l'action des plantes supérieures peut être considérée comme nulle dans le lac de Vézins), produisant un maximum d'oxygène, mais, ensuite, c'est le zooplancton qui se développe et produit du gaz carbonique au détriment de l'oxygène. Un deuxième maximum du phytoplancton amène à nouveau de l'oxygène, mais un deuxième maximum du zooplancton a lieu en même temps et non décalé comme le premier, d'où la production en surface d'une quantité plus grande de gaz carbonique.

Au fond du lac, dans l'hypolimnion, il existe, en début d'année, une quantité d'oxygène sensiblement égale à la saturation, l'action d'une partie du zooplancton en premier, puis, surtout celle des oxydations bactériennes, remplace progressivement cet oxygène par du gaz carbonique qui tend à former des carbonates. La stratification empêchant les échanges gazeux, il y a accumulation de gaz carbonique agressif. Mais, l'eau arrivant à Vézins est relativement pauvre en calcium : les roches encaissantes n'en libèrent qu'après leur décomposition et n'en offrent pratiquement pas de disponible à leur contact, la vase du fond en est très pauvre (moins de 0,12 g pour 1 kg de vase humide). Les dosages de calcium ne présentent effectivement pas de variations à ce moment. Il se forme alors d'autres carbonates qui sont, comme le montrent les courbes de dosage, des *carbonates de fer* sous la forme de bicarbonate ferreux $Fe(H_3CO_2)$. Nous retrouvons cette formation, résumée par RUTTNER (152] 1952), (voir aussi, le paragraphe suivant : Le fer).

Conclusion :

Les eaux de Vézins présentent toujours une alcalinité faible, ce qui est dû à la nature des terrains drainés, pauvres en calcium. La proportion des carbonates est aussi relativement faible, par comparaison avec celles rencontrées en général dans les eaux lacustres. Cependant, lorsque les conditions de la stagnation sont bien établies, la teneur en carbonates s'élève beaucoup sur le fond du lac à son point le plus profond d'où l'oxygène est totalement absent. La suite des dosages montrera que ce sont des carbonates de fer qui sont alors présents.

3. *Le fer*

Le fer a été dosé dans l'eau en fer total. Deux méthodes colorimétriques sont employées couramment, l'une utilisant le sulfocyanure de potassium et l'autre l'orthophénanthroline. Toutes deux offrent pratiquement la même précision. Au laboratoire de chimie de la Station du Paraclet, c'est la seconde de ces méthodes qui a été employée jusqu'en 1962. Le fer est libéré sous forme ionique par l'acide chlorhydrique à l'ébullition, puis réduit à l'état ferreux ; il peut, alors, donner une coloration rouge avec l'orthophénanthroline, permettant le dosage dans un colorimètre. La méthode au sulfocyanure ne nécessitant pas d'ébullition, le fer étant amené à l'état ferrique par le periodate de potassium sans chauffage, a été préférée à partir de 1962, la mise en œuvre sur le terrain pouvant être pratiquée, au besoin, plus aisément.

Le fer est largement répandu sur la terre, mais n'apparaît en solution dans l'eau que dans certaines circonstances. Il peut être, en effet, bi- ou trivalent (sels ferreux et sels ferriques). La forme ferrique est presque totalement insoluble, au moins pour les composés rencontrés dans les milieux naturels qui nous concernent, tandis que la forme ferreuse ne devrait pouvoir exister qu'en l'absence d'oxygène. La chimie du fer dans les eaux continentales a été travaillée surtout par Ohle (1934-1935), Einsele (1940) et Mortimer (1941-1942).

En théorie, le fer peut être engagé, dans les eaux douces, dans deux types principaux de cycles, soit avec le soufre soit avec l'acide carbonique. Lorsque de l'eau contenant du gaz carbonique vient au contact du fer ferreux, il se forme du bicarbonate ferreux ($Fe(HCO_3)_2$), qui est soluble. Mais, le fer ne peut exister sous la forme ferreuse que si l'eau contient très peu d'oxygène (moins de 0,5 mg/l selon Einsele). A Vézins, il y a, au fond du lac, dans la vase, une quantité relativement grande de fer ; ce fer pourrait se solubiliser et passer dans l'eau lorsque les conditions nécessaires sont satisfaisantes. Lorsque l'eau est à nouveau oxygénée, le bicarbonate ferreux est oxydé et de l'hydroxyde ferrique insoluble se forme :

$$4Fe(HCO_3)_2 + 2H_2O + O_2 = 4Fe(OH)_3 + 8CO_2.$$

L'hydroxyde formé donne une solution colloïdale, que l'on suppose précipitant lentement par agrégation des micelles. En fait, les expériences réalisées pour rechercher la formation des varves (4e partie) montrent la possibilité d'une précipitation très rapide, et apportent d'autres détails sur les phénomènes tels qu'ils doivent réellement avoir lieu à Vézins. C'est à l'existence de cette solution colloïdale que l'on doit attribuer la teneur en fer ferrique, non négligeable, de certaines eaux et la coloration rougeâtre, plus ou moins foncée, qu'elles sont alors susceptibles de présenter. C'est ainsi que l'on peut voir parfois le contenu des bouteilles d'eau du fond du lac virer de l'incolore au rouge pendant le trajet du retour au laboratoire ; une partie du fer ferrique formé se dépose et teinte les parois des récipients en polyéthylène utilisés. Il en découle, alors, dans les dosages, une erreur par défaut, qui peut être assez importante (cas probable en septembre 1961). Pour obtenir la plus grande précision, il serait nécessaire de procéder au dosage sur place comme pour l'oxygène. Mais les méthodes simplifiées, utilisables aisément à l'extérieur et ne nécessitant qu'une quantité réduite de matériel, sont aussi des méthodes de faible précision. De plus, pour que l'ensemble du travail annuel conserve son homogénéité et que les résultats soient parfaitement comparables, il faut que les possibilités de travail restent identiques

à elles-mêmes quelles que soient les conditions météorologiques, ce qui exclut le travail en plein air. L'idéal serait le véhicule laboratoire, dont l'intérêt a déjà été signalé (JACQUET 1950). [101]

Pour que le fer soit dissous par l'eau chargée de gaz carbonique, il faut qu'il soit à l'état ferreux ; afin que la dissolution puisse être relativement importante, une réduction préalable du fer doit prendre place. Elle se produit en l'absence d'oxygène mais, aussi, seulement en présence d'une matière réductrice qui peut être de la matière organique en décomposition. Cette réduction a lieu à un pH optimal de 6,5 mais jusqu'à 7,5 dans le sens de l'alcalinité. Il existe aussi, dans la littérature, un potentiel d'oxydo-réduction donné comme caractéristique de la transformation fer ferrique en fer ferreux, $E_H = 0{,}2$ volts à pH 7. Nous pouvons constater que les conditions nécessaires et suffisantes pour qu'une grande quantité de fer soit dissoute dans les eaux du fond de Vézins, sont parfaitement réalisées. Pendant la deuxième partie de la période de stagnation, le pH du fond, qui a été mesuré en 1962, n'a pas dépassé 7,5, il s'en est approché seulement en septembre et nous constatons qu'en 1961, lors des dosages, ce mois présentait, pour la teneur en fer de l'eau du fond, une anomalie relative qui peut trouver là une partie au moins de son explication ; en revanche, le pH atteignit 9,15 en octobre 1963, où la précipitation a pu commencer. Les conditions données ci-dessus pour la solubilisation du fer nous renseignent également sur les conditions de précipitation qui sont inverses : oxygénation, alcalinisation, milieu devenant oxydant, départ du gaz carbonique de l'eau.

Dans des lacs où les conditions favorables pour la dissolution du fer étaient réalisées, EINSELE (1944) a trouvé 18 mg/l au Krottensee et jusqu'à 41 mg/l au Zellersee, ces valeurs étant données par RUTTNER comme assez exceptionnelles. A Éguzon, des valeurs de 2 mg/l ont été trouvées et ce lac a été considéré comme un piège à fer. A Vézins, les maximums dosés sont 21,84 mg/l en octobre 1960 ; 16,44 mg/l en juin 1961, 30,8 mg/l en août et 11,6 mg/l en septembre (cette dernière valeur à 22 m seulement) et 37, 2 mg/l en octobre 1963. En général, les teneurs trouvées dans les lacs, même eutrophes sont de quelques mg/l.

A Vézins, nous constatons parfois de fortes teneurs en fer des eaux dès leur arrivée dans le lac au pont de Virey : 4,5 mg/l de fer en octobre 1960 et 4,82 mg/l en février 1961. Le reste de l'année, nous trouvons des valeurs souvent comprises entre 0,3 et 0,6 mg/l, seulement des traces en décembre 1961 et 0,14 mg/l en janvier de la même année. En 1963, la plus forte teneur en ce point fut de 0,95 mg/l en mars ; elle n'est remontée par la suite qu'à partir d'août. Dans leur ensemble, ces teneurs sont élevées ou très élevées pour des eaux de surface. La pollution déjà signalée à Saint Hilaire n'est sans doute pas étrangère à l'établissement de conditions favorisant une forte teneur en fer dans l'eau de la Sélune. Cette eau est en permanence trouble et très chargée en particules de tripton dans lequel le fer colloïdal, le fer particulaire et le fer de complexes organiques sont certainement abondants. Il ne faut pas oublier, non plus, que tous les terrains environnants sont des sources de fer, très riches, pour les eaux de ruissellement et les eaux d'infiltration superficielle qui se chargent en gaz carbonique au contact des racines, le pH du sol étant, d'autre part, plutôt acide avec absence de calcaire.

Au pont de la République, nous trouvons les deux maximums cités ci-dessus, ainsi qu'un autre (1,08 mg/l) en avril 1961 ; l'allure d'ensemble des courbes est la même. Au pont des Biards, les teneurs en surface sont, en général, plus faibles qu'aux

points 4 et 3 précédents ; en revanche, nous relevons 3,08 mg/l à mi-hauteur en février, 5,8 mg/l au fond en avril, 1,224 mg/l en août. C'est le maximum d'avril qui ressort le plus.

Au barrage, les teneurs en surface sont plus faibles encore : 0,52 mg/l en octobre 1960 ; le maximum annuel, en 1961, est en janvier avec 0,9 mg/l, ensuite, il n'y a plus que 0,38 mg/l en mai. Au contraire, en profondeur, dans la zone correspondant à l'hypolimnion, certaines valeurs atteintes sont les plus fortes qui aient été enregistrées ; nous les avons déjà citées plus haut ; elles s'opposent à celles de janvier et de décembre 1961 : 0,1 mg/l. Nous avons, en début d'année, une augmentation progressive du fer sur le fond, devenant très importante dès juin, puis une retombée semblant aberrante en septembre et qui est inexplicable actuellement. En octobre, le fer paraît avoir migré vers le haut, dans la totalité de la hauteur de l'hypolimnion, comme pour un début d'homogénéisation. En novembre, les conditions météorologiques ne permirent pas d'étudier le point 1, et en décembre, la circulation étant complète, la teneur en fer est retombée à un niveau très bas. Nous notons que les dosages de septembre présentent d'autres singularités au barrage : un maximum annuel très au-dessus des autres valeurs pour l'azote ammoniacal à 22 m et un maximum au fond, pour l'oxydabilité, qui n'est pas le maximum annuel, ce dernier, très légèrement supérieur, se situant en juin, à un moment où la teneur en fer était très forte.

Au pont de Vézins, après la sortie du lac, nous retrouvons l'allure générale de la courbe superficielle du début, mais avec des valeurs plus faibles dans leur ensemble et un décalage du maximum annuel qui passe, de février à avril (date du maximum du fond) au pont des Biards.

Les teneurs en fer, inférieures dans les eaux, au point 0, à celles des eaux à l'entrée et l'explication générale donnée par RUTTNER sur l'existence des lacs « pièges à fer » (1952 [152] page 78, premier paragraphe), m'ont amené à calculer le bilan du fer dans le lac en 1961 (tabl. 14).

Les teneurs au pont de Virey donnent les entrées, celles du pont de Vézins les sorties. Les deux valeurs manquent en juillet seulement et il semble logique, par l'examen du sens général des variations, de supposer que ce mois-là les entrées et les sorties s'équilibrent pratiquement. On arrive, d'ailleurs, presque au même résultat par l'intrapolation des valeurs sur la courbe ou le calcul, entre les mois de juin et août. Les différences en fer retenu ou cédé sont calculées par mois, en tenant compte des débits moyens et en supposant que toutes les eaux reçues par le lac ont la même composition que celle de la Sélune, ce qui n'est pas absolument exact (tabl. n° 8 pour comparaison) et peut entraîner une légère erreur dans le calcul. Il peut exister aussi une certaine dilution par les eaux de pluie, mais elle ne peut qu'être faible. La valeur trouvée en février, admise pour l'ensemble du mois, donnerait 117,8 g/s de fer retenu, soit 285 tonnes pour le mois. Cette valeur montre bien qu'il y a là une teneur accidentelle, suite directe de fortes pluies récentes, entraînant une turbidité de l'eau avec particules ferrugineuses mises en suspension. Le seul aspect de l'eau au moment des prélèvements et le fort pourcentage de tripton ramené par le filet à plancton confirment bien cette façon de voir ainsi, bien entendu, que le fait que de fortes pluies ont réellement précédé les prélèvements.

Si nous cherchons à établir le même bilan, mais entre le point 3 et la sortie du lac, nous devrons faire la même constatation en février en retrouvant la même

teneur en fer. Nous constatons que les analyses du point 3 sont moins représentatives de la teneur moyenne de l'eau, car elles sont menées sur des échantillons d'eau prélevés en surface (la profondeur du lac en ce point est, en général, comprise entre 5 et 6 mètres). D'autre part, sur la rive opposée, au point de prélèvement, arrive un petit ruisseau d'aspect torrentueux qui débite lui-même rapidement, après chaque pluie, une eau très trouble formant un « nuage » dans le lac proprement dit, sur une distance variable, mais qui peut, occasionnellement, atteindre le point de prélèvement, d'où une forte teneur en fer total. Ce nuage est dû à la mise en suspension des particules provenant de la décomposition des roches, particules existant surtout dans les limons quaternaires. Nous pouvons constater, par exemple, que lors du prélèvement datant d'octobre 1960, dans le ruisseau affluant dans le lac, au fond du bras de l'*Auberge du Lac* (affluent de Vézins), où les conditions météorologiques étaient les mêmes, avec des averses persistantes, les eaux étaient très troubles, chargées de particules en suspension et accusaient une teneur de 5 mg/l de fer total (tabl. 8). Pour éliminer ce facteur accidentel de l'apport de grandes quantités de fer

Calcul du bilan annuel d

Mois et jours	Entrées pt 4	Passage pt 3	Sorties pt 0	Différence pt 4 — pt 0	Différence pt 4 — pt 0	Débit moyen	Secondes dans moi
	g/m³	g/m³	g/m³	g/m³	g/m³	m³/s	secondes
Janvier (31)	0,140	0,014	0,014	— 0,126	0,000	28,74	2 678 400
Février (28)	0,227	0,357	0,090	— 0,137	— 0,267	24,80	2 419 200
Mars (31	0,314	0,700	0,280	— 0,034	— 0,420	11,11	2 678 400
Avril (30)	0,630	1,080	0,980	+ 0,350	— 0,100	9,38	2 592 000
Mai (31)	0,380	0,312	0,312	— 0,068	0,000	5,85	2 678 400
Juin (30)	0,230	0,186	0,312	+ 0,082	+ 0,126	3,72	2 592 000
Juillet (31)				# 0,000	# 0,000	2,69	2 678 400
Août (31)	0,314	0,314	0,230	— 0,084	— 0,084	1,71	2 678 400
Septembre (30)	0,380	0,270	0,270	— 0,110	0,000	1,27	2 592 000
Octobre (31)	0,660	0,420	0,420	— 0,240	0,000	2,57	2 678 400
Novembre (30)	0,500	0,200	0,700	+ 0,200	+ 0,500	4,62	2 592 000
Décembre (31)	traces	traces	0,200	+ 0,200	+ 0,200	11,35	2 678 400

particulaire pendant un temps bref, les deux valeurs au point 4 et au point 3 pour février ont été prises, pour le calcul du bilan, non comme des valeurs réelles trouvées, mais comme les moyennes entre les valeurs de janvier et de mars.

Les calculs faits montrent, pour l'ensemble du lac, la captation par celui-ci d'environ 4,6 tonnes de fer dans l'année, ce qui correspond au dépôt de 76 tonnes de vase sèche de même composition que celle relevée sous l'hypolimnion à proximité du barrage, renfermant 60 g de fer par kg de matière sèche soit, pour une teneur en eau de 80 p. 100, 380 tonnes de vase humide. Le lac ayant été vidé en 1952, en supposant que la valeur de 1961 soit une valeur moyenne et que la vase existant en 1952 ait perdu sa structure par dessèchement, ce qui est un phénomène irréversible, il devrait y avoir, depuis cette date, un dépôt d'environ 3 800 tonnes de vase molle. Si nous supposons qu'il y a actuellement 1 kg de cette vase par dm² dans les zones où elle existe, nous trouvons une surface de vase de 3 800 000 dm², soit 3,8 hectares. Cette dernière valeur, qu'il ne faut évidemment considérer que comme une approximation, permet cependant de penser que la valeur de 4,6 tonnes de fer,

4

lac de Vézins en 1961

Fe éch. par sec. entre		Fer échangé par mois entre					
4 et pt 0	pt 3 et pt 0	pt 4 et pt 0	pt 4 et pt 0	pt 3 et pt 0	pt 3 et pt 0	pt 4 et pt 3	pt 4 et pt 3
g/sec.	g/sec.	kg/mois —	kg/mois +	kg/mois —	kg/mois +	kg/mois —	kg/mois +
— 3,621	0,000	9 698				9 698	
— 3,397	— 6,621	8 218		16 017			7 799
— 3,377	— 4,666	1 010		12 497			11 487
— 3,283	— 0,938		8 509	2 431			10 940
— 3,397	0,000	1 064				1 064	
— 0,305	+ 0,469		790		1 216	426	
≠ 0,000	≠ 0,000						
— 0,144	— 0,144	386		386			
— 0,139	0,000	360				360	
— 0,616	0,000	1 650				1 650	
+ 0,924	+ 2,310		2 395		5 987	3 592	
+ 2,270	+ 2,270		6 080		6 080		

22 386 | 31 331 | 30 226
— 17 774 ← | — 13 243 ← | → — 16 790

04 612 | 18 048 | 13 436

→ — 04 612

13 436 ←

précipité pendant l'année 1961 dans le lac, est tout à fait du domaine du possible et même proche de la réalité.

Si, dans le tableau 14, nous examinons maintenant les colonnes correspondant au bilan entre le point 3 et la sortie du lac point 0, nous devons admettre que, loin de s'appauvrir en fer dès le début du lac, entre les points 4 et 3, les eaux se sont encore enrichies en fer ; le calcul du bilan entre les points 4 et 3 nous donne une libération globale de 13 436 kg s'exerçant sur les mois de février, mars et avril. De là, nous pouvons calculer une rétention réelle entre les points 3 et 0, qui est sensiblement quatre fois plus forte que celle trouvée sur l'ensemble du lac. Cette rétention paraît proche de la limite du possible à Vézins et, pour la contrôler, il y aurait lieu de rechercher, en amont du point 1, des vases en plus grande épaisseur qu'en 1 ou ayant une teneur en fer supérieure, puis, entre les points 3 et 4, la source possible du fer qui semble sortir.

En 1963, j'ai repris les dosages du fer, en surface, aux quatre points situés sur le lac, et au fond, au point 1 (voir tabl. 13). Les teneurs trouvées semblent varier plus régulièrement qu'en 1961. En mars, il a été trouvé une teneur assez forte de 0,95 mg/l aux points 3 et 4, mais cette teneur est identique aux deux points et ne traduit donc pas d'enrichissement entre eux. Ensuite, jusqu'en juin, il n'a été trouvé, au plus, que des traces en tous points. En juillet, le fer commence à apparaître dans l'eau sur le fond du lac, de façon assez importante avec 1,1 mg/l, ensuite, à partir d'août, les teneurs vont augmenter assez fortement partout et atteindre la valeur, extrêmement forte, de 37,2 mg/l sur le fond, au point 1, en octobre. En septembre et octobre, nous retrouvons l'enrichissement déjà noté du point 4 au point 3. Nous constatons, aussi, qu'au début de l'apparition du fer au point 1, en surface (août et septembre), la teneur y est un peu plus élevée qu'au point 2, mais, qu'ensuite, cette teneur redescend au-dessous de celle du point 2 ; l'explication est peut-être en partie au moins biologique, en rapport avec le développement massif des algues observé. A partir de fin novembre, les teneurs augmentent encore légèrement en surface, tandis que celle du fond rediminue de façon importante. J'ai, d'ailleurs, pu constater visuellement que le fer précipitait alors très fortement à 25 m, dans l'eau remontée de ce niveau pour l'étude algologique donnée d'autre part. En décembre, les teneurs en surface sont un peu plus faibles ou égales à celles du mois passé ; en revanche, la teneur du fond, au point 1, a baissé considérablement.

Après trois ans d'observations, je pense que la cause principale expliquant la dissolution importante du fer en février, mars et avril 1961, entre les points 3 et 4, doit être recherchée dans la remontée du niveau du lac durant ces mois.

Les berges, entre 3 et 4, particulièrement en amont, comprennent des surfaces de vase relativement importantes ; ces surfaces subissent à l'air l'action des agents atmosphériques, et du gel en hiver, ainsi que l'action des organismes fouisseurs, colonisateurs temporaires ; le résultat le plus apparent est une libération de fer à partir des complexes qui le retenaient précédemment. Les terrains non vaseux des berges qui subissent les mêmes actions arrivent à la même production quoique d'une façon moindre quantitativement. Lorsque le niveau du lac remonte, ce fer se trouve entraîné ; il est alors probablement à l'état colloïdal ou même particulaire. La couche vaseuse se renouvelle pendant ce temps de submersion. L'augmentation de la teneur en fer entre ces deux points a été retrouvée en 1963, mais seulement en septembre et octobre. Ce phénomène n'est pas la règle générale dans le lac.

Retenons qu'à Vézins, le fait dominant indirectement le métabolisme du fer est la pauvreté de l'eau en calcium dans ce lac, cependant très eutrophe, à cause de la pollution de la Sélune.

Si, par comparaison, nous examinons les résultats donnés pour Éguzon (P. Vivier et *al.*, 1956 [175]), nous sommes gênés, en premier lieu, par l'absence de dosages dans l'effluent du lac, ce qui empêche l'établissement du bilan. Mais, il semble que l'explication du cycle de fer avec formation de carbonate ne soit pas applicable ici ; au contraire, la présence signalée d'une vase à sulfure de fer laisse supposer l'existence d'un cycle où le soufre jouerait un grand rôle. Des exemples de tels cycles ont déjà été rencontrés en limnologie et sont même plus souvent invoqués que les cycles à bicarbonates pour expliquer les observations.

Notons aussi que, 6 fois sur 8, lorsque la comparaison est possible par l'existence de résultats concomitants, la teneur moyenne en fer est plus forte au deuxième point de prélèvement dans le lac d'Éguzon qu'en amont, à l'arrivée de l'affluent, ce qui recoupe la remarque faite à Vézins d'un enrichissement périodique des eaux en fer, dans la partie amont de ces lacs de forme très étirée.

Conclusion :

Le lac de Vézins est un piège à fer qui a retenu, en 1961, environ 4,6 tonnes de fer élémentaire ; le calcul a montré que cette valeur était très probable et parfaitement du domaine possible. Le cycle du fer en cause est un cycle à bicarbonate ferreux. Les eaux apportent de grandes quantités de fer particulaire et colloïdal, ainsi, sans doute que du fer complexé par les matières organiques des eaux polluées par l'agglomération de Saint-Hilaire-du-Harcouët. Pendant la stagnation, ce fer, qui est réduit à l'état ferreux par les fermentations, qui ont lieu dans la zone amont du lac, est parfaitement solubilisé dans l'hypolimniun de la partie profonde du lac. Il y a accumulation du bicarbonate ferreux dans ces eaux, le fer y diffusant à partir de celles de la surface, car les conditions de solubilisation y sont beaucoup plus fortes. Lorsque l'oxygène apparaît dans ces couches, le fer précipite alors sur le fond où il s'incorpore aux sédiments déjà en place.

4. *Le manganèse*

Le manganèse a été dosé à Vézins à partir d'avril 1963, en surface aux différents points, et au fond, au point 1 (voir tabl. 13). On constate qu'en surface, la teneur est toujours en dessous de la limite de mesure de la méthode de dosage employée (oxydation periodique).

Un volume connu d'eau est évaporé à sec, dans une capsule de silice, puis calciné deux heures au four à 600° ; on refroidit et on ajoute 5 ml d'acide sulfurique concentré ; le chauffage est poursuivi sur le bain de sable 30 minutes et le dosage est ensuite continué comme pour la vase (voir 4e partie). La disposition d'un grand volume d'eau pourrait permettre d'abaisser la limite de sensibilité. Il a été évaporé ici 500 ml d'eau au total pour chaque mesure. Sur le fond, la teneur varie comme celle du fer tout en restant plus faible ; ceci est conforme à ce qui a déjà été rapporté par les différents auteurs ayant étudié le manganèse dans les eaux, ainsi qu'au comportement chimique connu de cet élément. On détecte des traces en juin et juillet, puis la teneur

augmente et atteint 1,54 mg/l en octobre ; elle redescend ensuite comme celle du fer.

La chimie du manganèse suit de très près celle du fer dans les eaux ; seule, la forme manganeuse (Mn^{++}) est soluble à l'état ionique. Si du manganèse est présent dans l'environnement, il doit toujours exister dans l'eau, en même temps que le fer, le passage de la forme manganique à la forme manganeuse se faisant pour un potentiel d'oxydo-réduction plus élevé que pour la même transformation du fer. Il est donc aussi possible de trouver, dans l'eau, du manganèse en l'absence de fer. En fait, le nombre des oxydes de manganèse est élevé, et la chimie du manganèse est plus compliquée que celle du fer ; en général, la pyrolusite (MnO_2) est la forme stable qui est le plus souvent rencontrée.

La comparaison avec les valeurs rapportées par G. E. HUTCHINSON [99] (1957), montre que les teneurs extrêmes trouvées à Vézins sont les plus élevées qui aient été citées : 1 540 mg/m³ en octobre contre 850 mg/m³ dans les lacs suédois (d'après LOHAMMAR 1938), mais pour des eaux de surface. Les teneurs des eaux de surface sont variables d'un lac à l'autre, mais sont souvent au voisinage de 50 mg/m³ (0,05 mg/l) ; les plus fortes trouvées s'établissent souvent entre 250 et 300 mg/m³.

On a porté beaucoup d'intérêt au rapport Fe/Mn, le rapport moyen pour la teneur des roches accessibles étant de 50. En général, dans les eaux, le rapport trouvé est faible et oscille de 4,2 à 1,3, mais il peut aller jusqu'à 80. Les rapports sont, à Vézins, pour les eaux dont les teneurs en manganèse ont pu être chiffrées, donc au point 1 sur le fond de :

20	en août
35,6	en septembre
24,1	en octobre
12,5	en novembre.

La diminution du rapport, après septembre, traduit le fait que le manganèse tend à rester dans l'eau en plus grande quantité que le fer, ce qui est probablement en relation avec la différence des potentiels de solubilisation rapportée plus haut.

K. A. GUSEVA [82] (1939) a trouvé que le manganèse était toxique pour certaines algues, à des doses très peu supérieures à la moyenne des teneurs rencontrées ; d'après G. E. HUTCHINSON, il y aurait, cependant, lieu de vérifier ces résultats avant de les admettre totalement. D'après la même source (G. E. HUTCHINSON [99] 1957), KOYAMA et SUGAWARA (1953) conclurent de certaines recherches que la réduction des sulfates était inhibée dans la vase lorsque celle-ci contenait une certaine dose de manganèse. Cela pourrait s'appliquer, en partie, au cas de Vézins.

Conclusion :

Comme cela était prévisible par la connaissance des propriétés chimiques de ce corps, les variations du manganèse ont des rapports étroits avec celles du fer dans le lac de Vézins. En particulier, pendant la stagnation, la teneur des eaux du fond du lac devient très élevée. Le manganèse étant comparativement plus soluble que le fer, les phénomènes de captation ne sont pas aussi intenses pour le premier corps que pour le second et la presque totalité du manganèse apparaissant sur le fond provient surtout d'une redissolution périodique à partir de la vase en place.

5. *L'azote*

L'azote a été cherché sous les deux formes, nitrique et ammoniacale. Il peut exister, en plus, dans l'eau de l'azote nitreux, et de l'azote organique dans des substances organiques dissoutes, telles que des acides aminés. La somme : azote nitrique + azote nitreux + azote ammoniacal constitue l'azote minéral. L'azote minéral + l'azote organique donnent l'azote total qui peut être mesuré directement par la méthode classique de Kjeldahl.

L'azote des nitrates a été dosé colorimétriquement par la diphénylamine qui prend une teinte violette ; la méthode offre l'avantage d'une grande simplicité, mais demande à être exécutée en un temps soigneusement minuté, la coloration produite offrant une mauvaise stabilité.

L'azote de l'ammoniac a été étudié par le réactif de Nessler, réactif classique qui s'adapte bien à un dosage colorimétrique simple pour les teneurs habituellement rencontrées dans les eaux naturelles.

Dans les tableaux, les deux formes d'azote trouvées ont été additionnées pour voir si, dans certains cas, il n'y avait pas simplement évolution d'une forme vers l'autre sans modification de la teneur en azote ainsi représentée ; cette valeur a été appelée : azote total dosé.

Les sources normales d'azote, pour les eaux naturelles, sont : les eaux de pluie, 600 mg d'azote nitrique et ammoniacal par mètre carré, pour une précipitation annuelle moyenne de 1 650 mm (Ruttner, 1952 [152]) puis, le lessivage du sol amenant des nitrates dus surtout à l'action des bactéries nitrifiantes. Les nitrates naturels de certaines roches peuvent, aussi, jouer un rôle important dans certaines régions, mais pas à Vézins. Les eaux du sol et des rivières non contaminées ne contiennent de l'azote que sous la forme nitrique (de l'ordre de quelques dizaines de milligrammes à quelques milligrammes par litre). Toujours d'après Ruttner : « il n'y a aussi pratiquement d'azote dans les lacs oligotrophes que sous la forme de nitrates, sauf, exceptionnellement en surface, des traces occasionnelles de nitrites ou d'ammoniaque » ; pendant la stagnation d'été, les nitrates disparaissent progressivement des strates supérieures. Dans les lacs très eutrophes, en raison de la plus grande abondance du plancton, il est habituel de trouver, pendant les mois d'été, moins de nitrates en surface que dans les lacs oligotrophes, sans cependant que la teneur ne devienne nulle. Dans l'hypolimnion, en dessous du niveau à partir duquel l'oxygène tombe à quelques dixièmes de mg/l, les nitrates disparaissent et sont remplacés par des quantités croissantes d'ammoniaque. La disparition des nitrates à la limite de l'oxygène est due aux bactéries dénitrifiantes qui les réduisent en nitrites et en oxyde nitreux, puis en azote élémentaire. L'ammoniaque qui se forme provient, pour la plus grande partie, de la destruction des protides dans l'eau et de la couche superficielle de la vase. Il n'a pas encore été montré si la réduction des nitrates en ammoniaque par l'intermédiaire des nitrites, qui se produit très fréquemment dans la nature, se produit aussi à un certain degré dans les eaux. Il n'est pas impossible, cependant, qu'une partie de l'ammoniaque présent dans l'hypolimnion dérive de cette transformation.

Si nous considérons les variations à l'arrivée dans le lac, celles-ci nous apparaissent assez irrégulières et peu significatives, l'indépendance la plus complète semble exister entre les deux formes dosées ; la pollution n'est, sans aucun doute, pas étran-

gère aux maximums de l'azote ammoniacal relevés. Entre les points 4 et 3, nous enregistrons une baisse importante de la teneur en nitrates, qui correspond aux périodes de forte production de phytoplancton. Au pont des Biards et au barrage, les variations sont encore irrégulières ; il y a une nette diminution de l'ammoniaque entre les points 4 et 0.

Si nous comparons les deux formes de l'azote étudiées, nous voyons que les valeurs les plus élevées de l'une s'opposent souvent, dans le lac, à des valeurs faibles de l'autre. On ne peut, cependant, pas dire qu'il y ait une simple transformation comme, par exemple, entre le fer ferreux et le fer ferrique.

Conclusion :

L'étude des deux formes nitrique et ammoniacale de l'azote, dans le lac de Vézins, n'apporte que peu de faits intéressants. Dans l'ensemble, les écarts des nitrates sont de faible amplitude ; on note surtout la diminution sur le fond pendant la stagnation, une libération à partir des sédiments pendant la période de circulation et une diminution dans l'épilimnion aux époques de plus grande utilisation par le phytoplancton, ce qui est une connaissance classique. Pour l'ammoniaque, l'irrégularité est plus grande, l'enrichissement sur le fond est presque constant, bien que plus marqué à la stagnation. Une certaine quantité d'ammoniaque est amenée par les eaux à cause de la pollution signalée ; on constate une autoépuration importante pendant la traversée du lac. Bien que les grandes variations des deux formes de l'azote soient en opposition, il n'y a pas simple évolution d'une forme vers l'autre.

6. *Le phosphore*

Le phosphore se rencontre dans les eaux naturelles sous la forme de l'ion phosphate (PO_4^{---}). C'est un des éléments les plus indispensables pour la croissance des végétaux, puis, indirectement, des animaux. Comme il n'existe souvent qu'en quantités infimes dans l'eau, sa teneur est fréquemment le facteur limitatif de la productivité. Dans les lacs oligotrophes, on ne rencontre souvent que moins d'un millième de milligramme (1 µg) de phosphore minéral par litre, si bien que la teneur tombe assez souvent au-dessous de la limite de détection par la méthode extrêmement sensible au molybdate (RUTTNER, 1952 [152]). Le phosphore de l'eau provient directement ou indirectement de la destruction de roches phosphatées (telle l'apatite) du sol, bien que les phosphates du sol soient très difficilement dissous par les eaux.

Les dosages ont été faits par la méthode classique indiquée ci-dessus, au molybdate d'ammonium ; technique de Deniges, utilisant le réactif molybdotungstique et un bâton d'étain pour opérer la réduction du complexe phospho-molybdique formé et développer la coloration bleue utilisée pour la colorimétrie.

La Sélune amène, au pont de Virey, des quantités très faibles de phosphore. On trouve un apport maximal en août-septembre et minimal pendant la saison froide. Au pont de la République, les variations sont plus complexes et les teneurs maximales plus élevées. Ces maximums, du point 3, sont les maximums absolus pour l'ensemble des dosages dans le lac en 1961. Il n'a été trouvé de valeur supérieure qu'en octobre 1960, au barrage, à 5 mètres de profondeur (940 µg/l). Au point 2, la diffusion, à partir de la vase, est manifeste en début d'année et entraîne la précocité d'un maximum à ce niveau, qui correspond aussi à une élévation de la teneur en surface, cette

dernière restant cependant relativement basse, à cause de la consommation faite par le phytoplancton. En septembre, se produit une deuxième libération importante, à partir de la vase, vers le haut, d'où une fleur d'eau, à *Ceratium* principalement, mais les eaux de surface, recevant aussi du phosphore qui provient de la vase située en amont, principalement entre les points 3 et 4, à une faible profondeur, nous avons alors, en même temps, la fleur d'eau et la plus forte teneur. Dès le mois suivant, la baisse est considérable ; la mort du phytoplancton explique très probablement la valeur trouvée à mi-hauteur en novembre alors que, sur le fond, le processus de retour au sédiment est déjà en fonctionnement.

Ces échanges, entre la vase et l'eau, ont été particulièrement étudiés par MORTIMER qui, dans Esthwaite Water (un lac anglais), trouve une première libération du phosphore fin juillet, début août, et une deuxième en septembre. A Vézins, la première période d'échange apparaît donc plus tôt, ce qui est attribuable à une élévation plus rapide de la température. La profondeur d'Esthwaite Water étant de 14 mètres, au point de l'étude, ce lac se compare mieux à Vézins au point 2 qu'au point 1, barrage, pour lequel les résultats sont plus différents. En ce point, en effet, c'est surtout la grande irrégularité des variations qui ressort ; il faut noter que cela semble un fait très général dans la littérature. Je pense pouvoir l'attribuer à ce que les teneurs en phosphore, même les plus élevées, restent toujours très faibles ; elles sont donc susceptibles de subir de fortes modifications, en pourcentage, en réponse à la moindre perturbation des autres facteurs du milieu environnant : croissance ou mort du plancton, changements thermiques, même assez faibles, etc. Des variations, comparables en valeur absolue, pour des corps représentés à leur teneur maximale par des chiffres bien supérieurs, passent presque inaperçues, ou ne sont pas prises en considération.

Au pont de Vézins, la représentation graphique reproduit exactement celle déjà trouvée au barrage, au niveau correspondant pratiquement aux prises d'eau. Il ne faut pas oublier non plus qu'il y avait, en 1961, autour du pont de Vézins, une très abondante végétation submergée de plantes supérieures (*Elodea densa*) qui devait certainement jouer un rôle dans l'établissement de la teneur en phosphates à ce point.

Conclusion :

Les quantités de phosphore, que la Sélune apporte et enlève au lac, sont très faibles et présentent presque les mêmes variations ; ces quantités sont de l'ordre de grandeur habituel pour ce corps. Dans le lac, les variations relevées sont de plus grande amplitude et sont dues à l'interférence des phénomènes suivants : libération à partir des sédiments lorsque les conditions de la stagnation commencent à s'établir, utilisation par le phytoplancton, surtout sensible en juin, puis, libération à partir du plancton qui meurt et nouvelle précipitation sur le fond avec retour aux sédiments lorsque la circulation s'installe en fin d'année. L'apport externe est très faible, et le lac offre un métabolisme en circuit pratiquement fermé pour le phosphore.

7. *L'oxydabilité*

L'oxydabilité est la quantité d'oxygène enlevée à un oxydant, convenablement choisi, par les matières organiques contenues dans l'eau. Elle s'exprime en mg/l d'oxygène et est une représentation très approximativement proportionnelle à la

quantité de matières organiques présentes. Les valeurs trouvées dans la littérature sont, généralement obtenues en utilisant le permanganate de potassium comme oxydant et peuvent être données en milieu acide ou en milieu alcalin. On parle, alors, plus précisément de la mesure de l'oxygène consommé par les matières organiques, réservant le nom de mesure de l'oxydabilité à un test plus simple où l'eau est simplement laissée en contact un certain nombre d'heures à la température du laboratoire ou à l'étuve, ou pendant quelques minutes à l'ébullition, avec l'oxydant et en présence d'acide sulfurique. Les détails de ce dernier mode de mesure sont souvent fixés par des normes variant avec les pays et applicables, surtout, à des eaux susceptibles d'être polluées. Une titration en retour donnant la quantité d'oxydant restant, on en déduit la quantité réagissante. Au laboratoire de la Station du Paraclet, on emploie couramment la méthode utilisant le sulfate de cérium ($Ce(SO^4)^2$) comme oxydant. L'avantage est surtout la stabilité, à froid comme à l'ébullition, des solutions de ce corps, qui conservent donc ainsi leur titre beaucoup plus sûrement que celles du permanganate. Des essais ont montré que, dans la pratique, les résultats dépendent de la durée du contact et de la quantité d'oxydant présente, ce qui n'est pas spécial à cette façon d'opérer. Donc, à moins de connaître les détails des manipulations, il faut toujours éviter toute comparaison étroite des valeurs obtenues par des chercheurs différents.

La technique utilisée est celle de BEZEL (1945) avec modification de LECOQ (Congrès de Chimie industrielle, Paris, 1956). Les oxydabilités trouvées sont légèrement inférieures à celles données par la mesure avec le permanganate. Ce procédé rentre plus dans la catégorie des tests que dans celle des véritables dosages des matières organiques présentes. La réponse varie, d'ailleurs, non seulement avec la teneur en matières organiques, mais avec leur nature.

Au pont de Virey, la Sélune apporte au lac des eaux souvent assez chargées en matières organiques qui, du point de vue hygiénique, seraient souvent considérées comme mauvaises et, au moins, suspectes les autres fois. En 1961, nous trouvons un premier maximum en février (9,04 mg/l d'oxygène utilisé), qui est aussi le maximum absolu pour l'année, en ce point, et qui ne sera dépassé, pour tout le lac, que par des valeurs trouvées sur le fond, au contact de la vase. La teneur en matières organiques oxydables semble donc plus forte lorsque la température est faible, et inversement, cette teneur est nettement moindre lorsque la température est élevée. L'auto-épuration des eaux de la Sélune semble déjà nettement intervenir en amont du point 4, son intensité dépendant grossièrement de la température. D'autres phénomènes, qui peuvent être les variations à l'origine de la pollution elle-même, interviennent aussi dans la courbe annuelle trouvée.

Aux points 3, puis 2, les maximums d'oxydabilité s'estompent progressivement, ce qui traduit l'auto-épuration continue, depuis l'entrée du lac. Sur le fond, au point 2, il semble y avoir un apport de matières oxydables qui se solubilisent depuis avril jusqu'à un maximum en octobre, ce qui peut correspondre à une mort massive du plancton. Au barrage, les eaux de surface montrent une évolution qui continue celle déjà enregistrée en amont. En revanche, sur le fond, les maximums deviennent très importants. Il faut tenir compte que le bicarbonate ferreux est, lui aussi, oxydé lors de la mesure. La formule donnée précédemment, au chapitre du fer, nous montre qu'il faut 32 mg d'oxygène pour 223,4 mg de fer, sous la forme de bicarbonate ferreux ; cette correction, nécessaire, ne semble pas avoir été signalée dans la littérature. Dans

le cas présent, au barrage, sur le fond, nous obtenons donc les tableaux de corrections suivants :

Oxygène demandé par le fer ferreux (0,14 *mg pour* 1 *mg de fer*)

	Octobre 1960	Juin 1961	Juillet 1961	Août 1961	Septembre 1961	Octobre 1961
	—	—	—	—	—	0,65
	2,74	—	—	—	?	1,62
fond	3,06	2,30	?	4,31	?	0,65

Oxydabilités corrigées

	Octobre 1960	Juin 1961	Juillet 1961	Août 1961	Septembre 1961	Octobre 1961
	—	—	—	—	—	5,69
	2,91	—	—	—	?	7,12
fond	7,84	11,92	?	2,75	?	7,99

Les résultats seront les meilleurs lorsque les dosages de l'oxydabilité et du fer seront exécutés le plus rapidement possible après le prélèvement de l'échantillon à analyser, soit, au mieux, sur place même. Remarquons que la correction reste cependant juste, à chaque instant, si les deux dosages sont effectués simultanément. Elle présentera un grand intérêt chaque fois qu'une étude portera sur des eaux d'hypolimnion, à forte teneur en fer. Il ne semble pas que d'autres corps puissent jouer un rôle identique dans le cas particulier qui nous intéresse.

Au pont de Vézins, nous retrouvons pratiquement la courbe enregistrée au point 4, à l'entrée du lac. Certaines valeurs sont même souvent supérieures. Il faut conclure à un enrichissement en matières organiques, depuis le barrage, dans le trajet court le séparant du point de prélèvement. Comme il n'y a aucune cause de pollution organique importante sur ce parcours, il n'est possible que d'accuser la décomposition sur le fond des débris végétaux, extrêmement abondants, provenant des *Elodea densa* et des feuilles des arbres, bordant ici la Sélune.

Conclusion :

Nous constatons que l'auto-épuration, qui se manifeste nettement dans le lac, se trouve, du point de vue des matières organiques dissoutes, en grande partie annulée dans l'émissaire. Il y a le même maximum qu'à l'entrée du lac en début de l'année ; seul, le maximum enregistré en fin d'année, à l'entrée du lac, est amorti, mais par un étalement des valeurs qui reporte, en la partageant sur les trois derniers mois, la forte teneur qui existait en octobre seulement. Un parcours réduit, sur des débris végétaux en décomposition, suffit vraisemblablement pour annuler les phénomènes favorables qui ont eu lieu dans l'ensemble du lac. Les oxydabilités particulièrement élevées, trouvées sur le fond, pendant la stagnation, peuvent être attribuées à la présence de matières organiques, mais aussi, en partie, au carbonate ferreux mis en évidence d'autre part. Une correction indispensable a été introduite pour en tenir compte. Cependant, la concordance des variations de l'oxydabilité et de celles du fer, n'étant pas parfaite, il est visible qu'il y a aussi réellement une arrivée supplémentaire de matières organiques à cette époque.

8. *Le chlore*

Le chlore peut se rencontrer dans l'eau : sous sa forme gazeuse, uniquement dans les eaux de distribution après stérilisation, dans les eaux naturelles après certaines pollutions très particulières, ou sous la forme de l'ion Cl^- des chlorures, ce qui est le cas général. Dans le présent travail, le terme chlore a été employé pour désigner la teneur, en ce corps simple, correspondant à la quantité de chlorures dosés par la méthode classique de Mohr, solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent.

Des chlorures existent toujours en petites quantités dans les eaux douces naturelles, le chlore étant un élément assez répandu. D'après RUTTNER, le chlore n'étant pas essentiel pour la vie végétale, des différences dans sa stratification sont attribuables à des facteurs hydrographiques. HUTCHINSON [99] (1957) signale un apport possible par le vent, dans les lacs situés à proximité des côtes, mis en évidence par plusieurs auteurs, apport qui n'est pas négligeable : « MACKERETH et HERON (1954) trouvent que le lac Ennerdale, à 13 kilomètres de la côte, reçut, pendant une tempête d'Ouest de deux jours, le sel de 3 000 *tons* (1 *ton* = 1 016,062 kg) = 3 050 tonnes métriques d'eau de mer, ce qui n'a augmenté la concentration en chlorure que de 0,7 mg/l. » La situation géographique du lac de Vézins laisse supposer la possibilité d'un phénomène comparable.

Au point 4, nous trouvons, toute l'année 1961, une teneur variant assez peu autour de 20 mg/l de chlore provenant des chlorures. La courbe traduit cependant une tendance à l'augmentation, en fin d'année. Notons, qu'à Éguzon, les teneurs étaient presque exactement égales à la moitié de celles de Vézins et que, quoique l'augmentation en fin d'année ne ressorte pas aussi bien des chiffres donnés pour la Creuse à l'entrée du lac, elle est aussi rapportée. Le responsable de l'étude chimique (M. NISBET) signale qu'il y a là un phénomène fréquent dans des étangs, et qui n'a pas encore reçu d'explication. A Vézins, on peut être tenté de le mettre en rapport avec la proximité, déjà signalée, de la mer, les conditions météorologiques étant favorables à un apport provenant de cette source, plus abondant en fin d'année. Il doit y avoir alors, à la fois plus d'apports directs de la mer sur une partie du bassin versant, et plus de lessivage des terres par les précipitations plus abondantes. Notons que la courbe du sodium traduit aussi cette tendance à l'augmentation, quoique moins nette en fin d'année, ce qui peut être dû au fait que les organismes, qui ne prélèvent pratiquement pas de chlore, prélèvent un peu de sodium. D'autre part, les phénomènes d'échange d'ions avec les sols tendent, vraisemblablement, à retenir plus d'ions Na^+ que d'ions Cl^-, la teneur en potassium tendant, elle aussi, à monter légèrement à partir de mars, bien que cet élément soit très utilisé par les végétaux et qu'il existe en quantité beaucoup plus faible que le sodium.

Au point 3, nous retrouvons la même variation générale, tendance à une légère augmentation du chlore dosé pendant l'année. Cependant, en septembre et octobre principalement, les teneurs sont un peu plus faibles ici qu'au point précédent, ce qui tend à laisser supposer que les apports par lessivage des terres prédominent sur ceux dus directement aux précipitations sur le lac même, ces dernières produisant en conséquence, à cette saison, une dilution des chlorures dans le lac.

Aux points 2 et 1, en surface, il n'y a que peu de différences par rapport au point

précédent. En profondeur, des différences sensibles n'apparaissent qu'au point 1, il n'est pas possible de les expliquer. Au pont de Vézins, on retrouve la courbe de la surface au point 1, mais sans l'augmentation en fin d'année.

Conclusion :

La chimie du chlore est imparfaitement connue dans les eaux douces. A Vézins, on trouve, dans l'amont du lac et pour les eaux de surface, une augmentation des teneurs, qui se manifeste en fin d'année et qui se prolonge, très probablement, sur le premier mois de l'année suivante ; il y a là un phénomène qui semble assez général. Dans ce cas particulier, il peut être dû, en partie, à la proximité de la mer, du chlorure de sodium étant amené lors des tempêtes avec les embruns, à haute altitude. En revanche, dans les eaux de l'effluent, le phénomène est effacé et n'apparaît plus. Il n'est pas possible d'expliquer parfaitement ce qui se passe alors ; le lac semble retenir, par un processus non reconnu, l'excès de chlore qu'il reçoit périodiquement.

9. *Le sodium*

Le sodium a été dosé par spectrophotométrie de flamme à l'aide d'un spectrophotomètre de Jobin et Yvon. Ce procédé de dosage est le plus sensible et le meilleur, techniquement, qui puisse être employé pour ce corps.

Au point 4, les teneurs en sodium varient de 9 à 15 mg/l ; les variations de détail ne reproduisent pas, point par point, celles des chlorures. Cependant, une tendance à l'augmentation des concentrations en fin d'année ressort de cette courbe, comme de celle du chlore.

Au point 3, on trouve une plus grande homogénéité des valeurs dosées ; elles présentent la même tendance générale à l'augmentation avec l'avancement de l'année, tandis qu'au point 2, en surface, les quantités trouvées sont aussi peu différentes de celles du point 3. Cependant, la tendance à l'augmentation avec l'avancement de l'année n'existe pratiquement plus, la moyenne des six premiers mois étant : 13,30 et celle des six derniers : 13,71 mg/l. Il ressort plutôt de l'examen de la courbe, une certaine régularité des teneurs en fin d'année par rapport à celles du début.

Au barrage, sur le fond, la tendance des variations s'inverse, avec une moyenne plus basse pour la fin de l'année que pour le début. En décembre 1961, malgré la tempête du mois précédent, le sodium apparaît suivant une répartition encore très stratifiée. Au point 0, la différence entre les courbes du sodium et du chlore est extrême et laisse ressortir au moins une absence de relation directe entre ces deux corps, ici, dans la Sélune.

Cependant, si nous considérons l'ensemble des teneurs trouvées dans le lac, pour le chlore et le sodium, nous constatons que les teneurs en chlore sont souvent proches de 20 mg/l et celles du sodium de 13 mg/l, proportions qui sont pratiquement celles de ces deux corps dans le chlorure de sodium, 35,5 pour 23. Dans le détail, certaines conditions doivent agir en élevant, ou en diminuant sélectivement la teneur d'un seul de ces corps.

Conclusion :

La teneur en sodium ne présente que des variations assez peu marquées sur les courbes, surtout dans le lac proprement dit. A l'arrivée dans la retenue, on

retrouve l'augmentation de fin d'année déjà enregistrée pour le chlore, ce phénomène étant effacé dans l'effluent. Bien que ne variant pas de façon identique, les teneurs en ces deux corps ne sont cependant pas souvent très éloignées de la proportion existant dans le chlorure de sodium.

10. *Le potassium*

Le potassium a été dosé, à Vézins, comme le sodium par spectrophotométrie de flamme, méthode qui s'adapte très bien aux teneurs rencontrées normalement, de l'ordre de quelques milligrammes par litre. On ne possède encore que peu de connaissances sur le comportement général du potassium dans les eaux, cependant, OHLE a mis en évidence une nette augmentation dans les couches profondes des lacs baltiques (cité dans RUTTNER 1952 [152]). Le potassium est indispensable aux végétaux, et il peut être apporté parfois en assez grande quantité par les eaux de ruissellement, en raison de l'utilisation de certains de ses composés comme engrais.

Au point 4, dans la Sélune, la courbe montre le maximum annuel en février, à 3,7 mg/l, suivi du minimum annuel en mars (1 mg/l), ensuite malgré de légères variations en plus ou en moins, il ressort nettement de la courbe, une augmentation presque régulière de la teneur qui arrive, progressivement, à 3,42 mg/l en octobre et redescend jusqu'en décembre.

Au point 3, le minimum annuel est aussi, en mars (0,5 mg/l) ; il peut s'interpréter comme correspondant à une grande utilisation, au début de la période d'abondance du phytoplancton. D'avril à septembre, les apports et la libération par le plancton mort doivent compenser pratiquement la demande et en octobre la libération doit dépasser, nettement, la demande.

Au point 2, en surface, l'évolution d'ensemble est la même. Cependant, depuis l'entrée des eaux dans le lac, on note une grande régularisation de l'allure de la courbe de variation annuelle. Le minimum s'est étendu en faisant disparaître le maximum de février ; le maximum d'octobre, de moins en moins marqué, persiste encore. On note que la teneur en mai est toujours légèrement supérieure à celle de juin ; ce qui se retrouvera au barrage. Sur le fond, la régularité de la courbe ne se retrouve plus si bien.

Au barrage, en surface, le maximum annuel a été trouvé en décembre avec 3 mg/l ; la teneur d'octobre est aussi très forte. L'explication de ce phénomène semble assez évidente : nous retrouvons ici, comme au pont des Biards, des teneurs élevées au fond, surtout en fin de période de stagnation ; au moment de l'établissement de la circulation ces quantités de potassium sont réparties dans l'eau, de plus la mort d'une grande partie du phytoplancton aboutit à une libération de potassium et à une diminution de son utilisation. Le minimum est encore en mars, 0,5 mg/l, mais ici, on ne peut plus parler d'une augmentation lente des teneurs, dès le mois de mai elles varient peu au-dessus de 2 mg/l.

Sur le fond, on note, en mars, une augmentation localisée du potassium. Il y a, en même temps, une augmentation sensible de la teneur en fer ainsi que de celle de l'azote ammoniacal, pour ces corps le phénomène n'est pas limité à mars mais se retrouve les mois voisins. En revanche, il y a aussi, augmentation, bien limitée au même point, de la teneur en phosphore qui, de traces, passe à 0,01 mg/l ce qui est une augmentation assez importante pour ce dernier corps qui suggère qu'une décom-

position plus active de substances organiques a eu lieu sur le fond lors de ce prélèvement.

Au pont de Vézins, après un minimum en février (0,7 mg/l), et une remontée progressive jusqu'en mai (2,35), la teneur varie assez peu, sauf une faible augmentation dans les derniers mois. Par comparaison avec les teneurs relevées dans la Sélune à l'arrivée dans le lac, nous avons une régularisation presque parfaite qui semble due, en grande partie, à l'utilisation du potassium particulièrement importante en début d'année, par le phytoplancton. On retrouve l'observation de OHLE d'un enrichissement sur le fond pendant la période de stagnation.

Conclusion :

Les courbes du potassium traduisent, en début d'année, une variabilité beaucoup plus grande que celles du sodium, ce qui est en rapport direct avec l'utilisation très importante de ce corps par les végétaux ; en fin d'année, les teneurs sont plus régulières, le plancton qui meurt est assez abondant pour que le potassium qu'il libère compense celui qui est utilisé par le plancton vivant. Pendant la stagnation, les échanges étant freinés, on trouve un enrichissement sur le fond, surtout marqué en août, septembre et octobre. En même temps, les teneurs de la surface sont devenues très régulières comparativement aux variations qu'elles présentaient en début d'année. La traversée du lac semble aussi amortir les variations du potassium dans les eaux de la Sélune.

II. *Le calcium*

Le calcium a été dosé par complexométrie, en présence de purpurate d'ammonium ou murexide, comme indicateur. Le complexon III est le sel disodique de l'acide éthylène-diaminététraacétique, il forme, avec les alcalino-terreux, un complexe de type chélate. On verse la solution titrée de complexon à la burette ; lorsque tout le calcium est complexé, la murexide vire au violet. Il faut, bien entendu, se placer dans les conditions de pH convenable et éliminer préalablement, au besoin, les ions susceptibles d'interférer. Le détail de la méthode est donné dans RODIER (1960) [151]. A titre d'exemple, on considère qu'une eau potable de bonne qualité peut renfermer de 100 à 140 mg/l de calcium et que c'est seulement au-dessus de 200 mg/l que les eaux présentent des difficultés sérieuses pour les usages domestiques (RODIER, 1960 [151]).

A Vézins, la teneur en calcium est faible, phénomène normal étant donné la nature des terrains drainés par la Sélune. Au point 4, à l'entrée des eaux de la Sélune dans le lac, la teneur est minimale en janvier (5,6 mg/l ; le maximum annuel absolu pour ce point est 10,6 mg/l en juillet, ensuite la teneur baisse presque régulièrement jusqu'en décembre pour arriver à 6 mg/l). Il n'y a qu'une légère remontée en novembre par rapport à octobre, pour perturber la régularité.

Au point 3 (pont de la République), l'allure de la courbe a assez peu varié, la différence la plus importante étant une baisse de la teneur en avril.

Au point 2 (pont des Biards), en surface, les différences sont plus grandes. En janvier et décembre, nous trouvons la même teneur minimale 5,2 mg/l, le maximum annuel n'est plus en juillet mais en août avec 10 mg/l. Sur le fond nous retrouvons presque la même courbe qu'en surface, mais paraissant plus régulière à cause d'un

plus grand écart entre les teneurs extrêmes. A mi-hauteur, au contraire, la régularité est grande à cause du phénomène inverse.

Au point 1 ; en surface, nous trouvons en août une teneur extrême, anormalement forte pour le lac, de 20 mg/l, teneur correspondant à un extrait sec très élevé, qui ne peut donc être attribuée à une erreur de dosage. Comme autre chiffre remarquable de l'analyse de cet échantillon, on trouve une faible teneur en magnésium et une oxydabilité forte. Sur le fond, les variations apparaissent très indépendantes de celles de la surface pendant la période de stagnation, tandis qu'en période de circulation elles sont peu différentes.

Par comparaison avec Éguzon, où le calcium a été dosé par une autre méthode, nous constatons que les plus faibles teneurs de Vézins sont généralement supérieures mais pratiquement du même ordre de grandeur que celles d'Éguzon, et que les plus fortes de Vézins sont nettement inférieures aux plus fortes d'Éguzon (57,3 mg/l). A Éguzon, la régularité des résultats ne semble pas plus forte qu'à Vézins, mais les grandes lignes de la variation sont exactement inverses de celles de Vézins : minimum en mai-juin et maximum en décembre-janvier.

Conclusion :

La teneur en calcium est faible dans les eaux du lac de Vézins, mais normale pour des eaux situées sur des terrains du type de ceux drainés par la Sélune. Nous avons les teneurs minimales en décembre-janvier et les plus fortes en juillet-août, en surface. Sur le fond, les plus fortes teneurs sont aussi rencontrées pendant la stagnation, ce qui est normal étant donné la présence de grandes quantités de gaz carbonique à cette époque. Le maximum trouvé en août, en surface, correspond à une diminution du phytoplancton et à la présence d'une grande quantité de zooplancton, copépodes principalement.

12. *Le magnésium*

Le magnésium a été dosé comme le calcium, par complexométrie, en utilisant le noir d'ériochrome comme indicateur. Dans ce cas, le virage se produit lorsque les ions calcium et les ions magnésium ont été complexés. Il faut donc connaître préalablement la teneur en ions calcium, le magnésium s'obtient par différence. Notons que cette méthode est plus destinée à mesurer la dureté totale de l'eau (ou teneur en alcalino-terreux) qu'à fournir un dosage de grande précision du magnésium. Deux autres corps sont, à Vézins, susceptibles d'agir sur ce dosage : le fer, au-dessus de 20 mg/l (soit pratiquement en août au point 1, sur le fond), et le manganèse bivalent (Mn^{++}) qui n'a pas été dosé séparément en 1961. On peut considérer, ici, que les teneurs trouvées représentent toujours sauf, exceptionnellement, pour le point 1, sur le fond, les teneurs réelles en magnésium, avec une très bonne approximation.

Au point 4, dans la Sélune, nous avons, en septembre, le maximum annuel de 7,2 mg/l ; en décembre, 3,1 mg/l représente le minimum annuel.

Au point 3, les teneurs de janvier à août apparaissent un peu plus irrégulières qu'au point 4. Ce que nous retrouvons, et qui est le trait principal de l'évolution annuelle du magnésium dans le début du lac, c'est la forte teneur en septembre 7,2 mg/l, qui se continue un peu sur octobre.

Au point 2, en surface, les variations sont différentes tout en étant, comme en 3, caractérisées par une grande irrégularité. Il est pratiquement impossible de dégager

ici un schéma d'ensemble des variations, qui soit simple, et que l'on puisse avoir quelques chances de retrouver les autres années. Sur le fond, au contraire, la constance des teneurs existe presque.

Au barrage, en surface, l'irrégularité des variations se retrouve. En septembre il y a 8,6 mg/l, ce qui est la teneur la plus forte relevée. Malgré l'irrégularité de la courbe représentative, il y a, pour ce mois, un pic particulièrement marqué. Sur le fond, l'aspect est plus régulier. Il faut tenir compte de la présence du fer et du manganèse pour interpréter les teneurs plus fortes trouvées pendant la stagnation.

Au pont de Vézins, point 0, les teneurs sont toujours irrégulières : le maximum annuel s'étend sur septembre et octobre avec 6,7 mg/l, le minimum en décembre, 3,1 mg/l.

Conclusion :

De l'ensemble des variations du magnésium, le seul aspect constant est une forte teneur en septembre qui se prolonge parfois sur octobre, et une teneur faible en décembre. En début d'année les valeurs sont toujours essentiellement variables autour d'une moyenne proche de 5 mg/l. Les variations du magnésium sont voisines de celles du calcium, ce qui est théoriquement prévisible.

13. *Le soufre*

Le soufre a été recherché, à Vézins, en 1963, sous la forme de l'ion SO_4^{--} principalement et, accessoirement, sous la forme de sulfure, sur le fond, au point 1, à partir de septembre.

L'ion SO_4^{--} a été dosé par néphélométrie de la suspension de sulfate de baryum, formée après addition de chlorure de baryum et avec l'adjonction de Tween 20 qui stabilise la suspension (Rodier [151] 1960) (tabl. 13). Comme pour les autres dosages de 1963, les teneurs trouvées ne deviennent importantes qu'à partir d'août. En surface et pour tous les points de prélèvement, les teneurs augmentent jusqu'en octobre et rediminuent ensuite. Celles du point 3 sont égales ou inférieures à celles du point 4 ; tout se passe comme s'il y avait une certaine attaque (réduction ?) des sulfates en amont du lac. Les variations sont irrégulières entre les autres points mais finalement, en 1, on retrouve presque exactement les teneurs du point 4.

Sur le fond, il y a moins de sulfates qu'en surface, ils disparaissent même totalement en septembre et réapparaissent ensuite. On peut admettre le phénomène, rapporté au sujet du manganèse, de l'arrêt de la sulfato-réduction par ce corps. En septembre, tous les sulfates présents ont été réduits sur le fond (on trouve en effet, 0,77 mg/l de soufre du SH_2 qui correspond à 2,307 mg/l de SO_4 réduit), mais ensuite, la quantité de manganèse présente arrête la réduction et l'on retrouve des sulfates (venant des couches d'eau immédiatement supérieures et voisines) tandis que les sulfures présents ne doivent plus augmenter beaucoup. A partir de novembre, c'est l'oxydation qui prend place, à son tour sur le fond.

Conclusion :

4 mg/l peut être considéré comme une valeur moyenne du contenu en ion SO_4^{--} des eaux douces, généralement rencontrées sur roches cristallines (éloignées de roches telles celles du trias salifère). La pauvreté des eaux du lac en début d'année semble anormale et est probablement accidentelle.

14. *Le résidu sec*

Le résidu sec s'obtient par évaporation, dans une capsule tarée placée sous un épi-radiateur, d'un volume connu d'eau privée de ses particules en suspension. La filtration sur filtre, préalablement lavé, semble la méthode recommandable.

D'après Ruttner (1952 [152]), dans les eaux douces normales le résidu sec consiste principalement en quelques sels seulement, les carbonates, sulfates et chlorures de calcium, magnésium, sodium et potassium, puis de l'acide silicique, de petites quantités de composés azotés et phosphoreux. Dans des circonstances spéciales, des composés de fer et de manganèse peuvent y entrer pour une certaine valeur ainsi que, pour une très faible partie, des composés organiques qui ne sont pas détruits, à la température atteinte, par le procédé d'évaporation. Dans les eaux de lacs normaux, les valeurs suivantes donnent une idée de l'ordre de grandeur : la majorité des lacs alpins ont de 100 à 200 mg/l, les lacs baltiques ont de 200 à 400 mg/l et les lacs pauvres en sel, rencontrés particulièrement en Scandinavie, ont moins de 50 mg/l. Alors que dans la mer il y a surtout des chlorures, dans les eaux douces ce sont surtout des carbonates qui dominent et naturellement, dans la plupart des cas, le carbonate et le bicarbonate de calcium.

A Vézins, au point 4, dans la Sélune arrivant dans le lac, les résidus secs ont varié, en 1961, entre 62,5 mg/l en décembre et 145 mg/l en août.

Au point 3, la courbe présente un aspect moins régulier, par rapprochement des valeurs extrêmes. Au pont des Biards, point 2, en surface, la régularité des teneurs est un peu moins bonne, la position des minimums et des maximums est profondément modifiée.

Sur le fond, les variations sont franchement différentes de celles de la surface ; l'augmentation du résidu sec, de juin à octobre, est remarquable.

Au point 1, en surface très grande irrégularité des teneurs. La dernière partie de la courbe, de juillet à décembre, reproduit de près celle qui a été enregistrée pendant le même temps au point 4. Maximum annuel absolu en août (160 mg/l). Sur le fond, la courbe est totalement différente de la précédente. On note en premier lieu, une augmentation lente et régulière de janvier à mai, ensuite deux pics importants en juin et en septembre (177,5 mg/l), puis les teneurs redescendent jusqu'à 115,mg/l en décembre. A partir de juin, cette courbe reproduit très exactement les variations de la courbe de l'oxydabilité trouvée au même point, ce qui indique que, sur le fond du lac, dans sa partie la plus profonde et pendant la stagnation, une quantité de matières réductrices se solubilise. Cette quantité est suffisamment importante pour que sa teneur devienne prépondérante dans l'extrait sec. On peut également considérer comme très probable que ces matières sont des carbonates et des complexes organiques avec du fer. En octobre, le fort résidu sec, trouvé précédemment sur le fond seulement, semble se répartir vers les niveaux plus élevés. Pour le fer, nous avions trouvé, à cette époque, une véritable remontée, ce qui met bien en évidence un certain lien entre ces différentes données ; pour l'oxydabilité, c'est la répartition sur les couches inférieures qui est alors observée.

Au pont de Vézins, point 0, le résidu apparaît comme variant assez peu autour de 100 mg/l. Exception faite de la teneur en décembre, 52,5 mg/l, les valeurs s'échelonnent entre : 80 mg/l en juin et 117,5 mg/l en novembre. Sauf pour décembre, la traversée du lac a régularisé nettement les variations du résidu sec de l'eau de la Sélune.

Conclusion :

Le résidu sec reproduit fidèlement les variations majeures des corps dosés susceptibles d'en faire partie et donne un moyen de contrôle de certains des autres dosages. La Sélune apporte des eaux assez peu chargées en extrait sec (après filtration) ; la traversée du lac régularise encore beaucoup les variations. Au point 1, l'extrait sec suit la teneur en fer pour le fond, tandis qu'en surface c'est la forte teneur en calcium d'août qui est mise en évidence.

15. *La conductivité*

La conductivité a été mesurée à l'aide d'un conductimètre universel Philips. C'est un pont de Kohlrausch utilisant un trèfle cathodique comme indicateur de zéro. Une cellule de même marque, comportant deux plaques de platine de 1 cm² distantes de 1 cm, est reliée à l'appareil lors des mesures. Les conductivités ont été calculées avec une correction de température, la cellule étant fréquemment contrôlée dans des solutions titrées de conductivité connue. Les mesures ont été faites au laboratoire. La conductivité est une méthode de mesure aisée de la salinité, ou teneur totale en corps dissous, mais, contrairement à l'extrait sec, elle enregistre l'action des corps gazeux. L'expérience montre que, pour cette raison au moins, les variations de la conductivité ne reproduisent pas, en général, celles du résidu sec. Les modifications de la conductivité de l'eau fraîchement distillée, par simple dissolution de quelques gaz, sont bien connues.

Nous remarquons les particularités suivantes : la conductivité minimale, au point 4, en février ($98{,}1 \times 10^{-6}$ mho/cm), alors qu'au même point le maximum est de 128, (la même unité étant toujours employée) et que, dans le lac, on trouve des valeurs toutes supérieures à 100 ; nous n'aurons qu'ensuite 94,3, au point 4, dans l'émissaire. Les variations les plus importantes sont sur le fond, dès le point 2. Au point 1, à ce niveau, il y a une correspondance presque parfaite, entre les deux courbes, de la conductivité et du résidu sec ; le maximum annuel est trouvé en juin avec 188,6. Au point 4, les variations ci-dessus ne sont pas concomitantes en début d'année ; en revanche, à partir de juin, la correspondance se retrouve, ce qui n'existait pas à l'entrée du lac.

Conclusion :

Nous constatons que nous avons relevé un certain nombre de valeurs qui se distinguent par leur élévation remarquable au-dessus de la moyenne observée. Ces valeurs ont été trouvées pendant la période de stagnation sur le fond mais aussi en surface ; seulement au point 1, où la retenue de Vézins a le plus les caractères d'un grand lac. Les analyses d'octobre 1960 nous donnent aussi, sur le fond, une valeur particulièrement forte qui s'intègre très bien dans la série des observations :

1° Les valeurs ainsi repérées correspondent à des résidus secs très forts, alors que l'inverse n'est pas toujours vrai ; il ne l'est jamais en particulier, pour la partie amont du lac de retenue, à caractère d'étang ou de rivière.

2° En surface la forte conductivité correspond à une forte alcalinité et à une forte teneur en calcium (teneur forte pour Vézins bien entendu), avec une teneur relativement basse en oxygène et, très probablement, élevée en CO_2.

3° Sur le fond, elle correspond aussi, en octobre 1960, à une forte alcalinité et très probablement de même en 1961. Si la teneur en calcium peut être en même temps assez forte, ce n'est pas dans la même proportion qu'en surface et cela reste accidentel ; en revanche nous trouvons toujours, en même temps, une forte oxydabilité et une teneur en fer très élevée, mais il est possible de trouver une teneur en fer élevée sans avoir, automatiquement, une très bonne conductivité.

Ceci montre, entre autres choses, que dans un lac de ce type, le fer peut jouer, vis-à-vis du gaz carbonique dissous, un rôle comparable à celui du calcium ; en même temps, l'augmentation de l'oxydabilité semble indiquer la solubilisation de matières organiques.

16. *La transparence*

Elle a été étudiée, en 1963, à l'aide d'un montage du type du disque de Secchi, constitué par un pavé de faïence blanche percé en son centre. Voir le tableau 13 pour les résultats.

La transparence maximale trouvée est de 2,90 m, donc assez faible ; elle présente deux pics sur la courbe, en mai et en octobre, et elle est en relation directe avec le plancton et les matières humiques présentes dans l'eau.

Je n'ai pu disposer d'une cellule photo-électrique immergeable qui m'aurait permis de préciser ce point d'une façon plus moderne.

17. *Les proportions et rapports chimiques*

Ces données apportent des points de comparaison entre lacs et sont aussi intéressantes à rapprocher des observations du plancton ; elles servent de départ pour le calcul de milieux de culture équilibrés.

Le rapport. $\frac{Mg}{Ca}$ a été calculé par quelques auteurs, par exemple, dans les lacs du nord-est du Wisconsin, Juday, Birge et Melloche (1958) trouvèrent que le rapport $\frac{Mg}{Ca}$ diminuait régulièrement avec l'augmentation du calcium, à partir de 0,77 (en poids), dans des lacs dont la teneur moyenne en Ca était de 0,65 mg/l (d'après Hutchinson 1957 [99]).

A Vézins, la teneur moyenne en calcium est très supérieure (8 mg/l) à celle des lacs cités ci-dessus. Si nous portons les points représentatifs de Ca et de Mg correspondants sur une abaque, nous constatons que, à quelques teneurs exceptionnelles près, le rapport $\frac{Mg}{Ca}$ est inférieur à 1 et supérieur à 0,25. Relevée sur le graphique, sa valeur moyenne est voisine de 0,65 et, ici aussi, on constate une diminution de ce rapport lorsque Ca augmente, par exemple pour Ca $>$ 10 mg/l : R $<$ 0,7 ; pour Ca $>$ 12 mg/l : R $<$ 0,6 ; pour Ca $>$ 16 : R $<$ 0,4. Pratiquement, la plupart des points forment un nuage concentré dans l'aire limitée par Ca = 5 mg/l et Ca = 10 mg/l, Mg = 3,5 mg/l et Mg = 6,5 mg/l, et tombent dans les rapports compris entre 0,4 et 0,9 (pl. 2).

Les variations mensuelles du rapport $\frac{Mg}{Ca}$ sont résumées dans le tableau suivant,

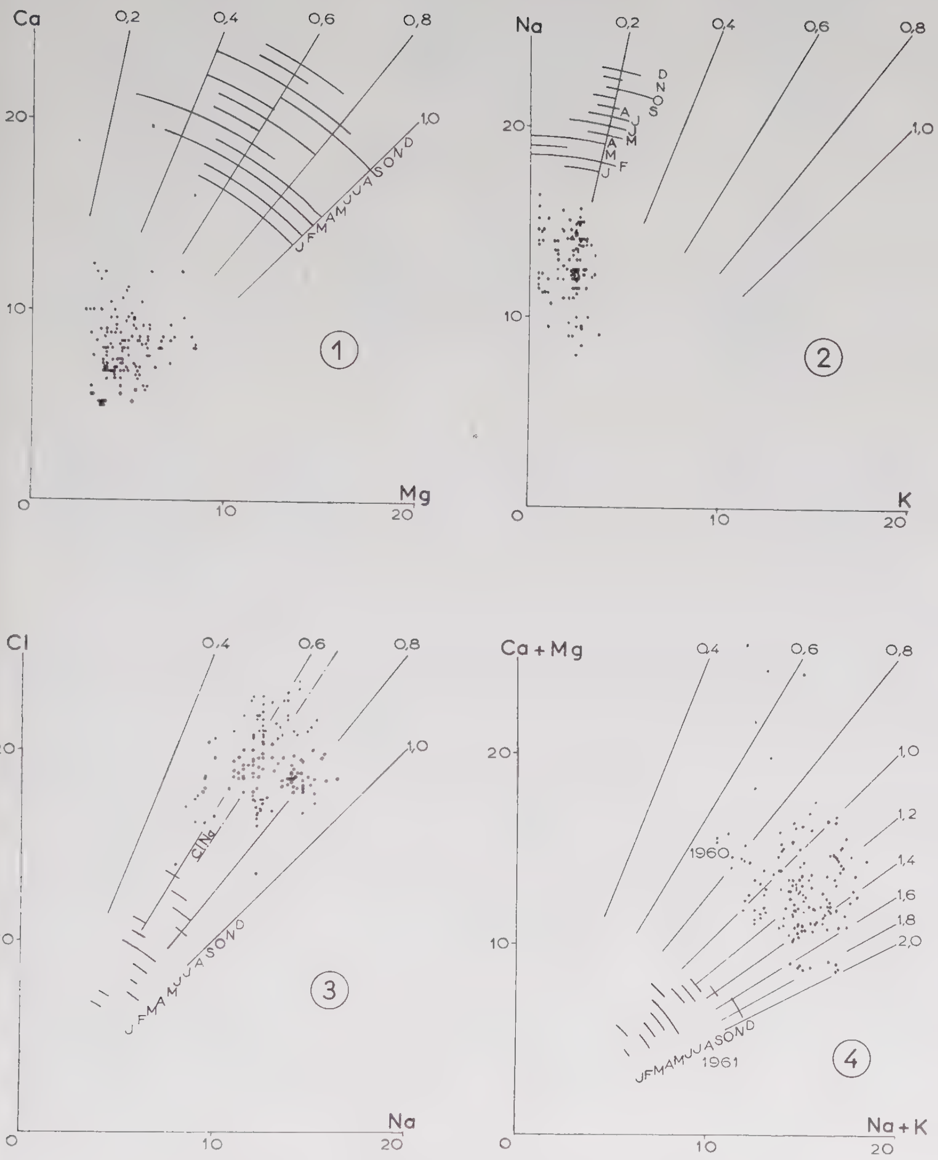

Planche 2. — *Étude des variations des rapports entre les principaux cations. Les arcs de cercles correspondant à la variabilité par mois en 1961.*

1) rapport Mg/Ca, 2) rapport K/Na, 3) rapport Na/Cl, 4) rapport des alcalins sur les alcalino-terreux: Na + K/Ca + Mg ; les valeurs d'octobre 1960 tombent en dessous de celles de 1961.

les quelques valeurs extrêmes tombant très en dehors de chaque nuage de points ayant été déduites :

septembre	1960	0,60 > R > 0,25	Variation	0,35
janvier	1961	1,00 > R > 0,50	—	0,50
février	—	0,90 > R > 0,50	—	0,40
mars	—	1,00 > R > 0,65	—	0,65
avril	—	1,00 > R > 0,50	—	0,50
mai	—	0,70 > R > 0,25	—	0,45
juin	—	0,60 > R > 0,45	—	0,15
juillet	—	0,80 > R > 0,45	—	0,35
août	—	0,60 > R > 0,40	—	0,20
septembre	—	1,05 > R > 0,60	—	0,45
octobre	—	0,85 > R > 0,40	—	0,45
novembre	—	0,65 > R > 0,50	—	0,15
décembre	—	0,75 > R > 0,50	—	0,25

le rapport $\frac{Mg}{Ca}$ montre une tendance à diminuer de janvier à mai pour augmenter ensuite jusqu'en septembre puis rediminuer en fin d'année. On note que les valeurs sont plus dispersées en début d'année de janvier à mai, et en septembre et octobre ; c'est en septembre que les plus grandes valeurs du rapport sont atteintes, dépassant légèrement 1.

Le rapport $\frac{K}{Na}$ d'après les mêmes sources et pour les mêmes lacs, tombe avec l'augmentation du sodium. Dans 8 lacs contenant moins de 0,5 mg/l de sodium, le rapport est 4,1 (en poids) ; dans les 2 lacs contenant plus de 1,5 mg/l de sodium, le rapport est 0,69 (en poids).

A Vézins, le sodium est très au-dessus de ces valeurs, en général plus de 10 mg/l, ce qui correspond alors à un rapport plus petit que 0,3, ceci est donc parfaitement en accord avec les observations des auteurs cités. Lorsque Na > 14,3 mg/l : $\frac{K}{Na} < 0{,}2$, ce qui correspond aussi à une variation dans le même sens ; un grand nombre de points représentatifs tombent sur ou à proximité immédiate de la ligne correspondant à $\frac{K}{Na} = 0{,}2$, nombre d'entre eux se superposent même, pratiquement le « nuage » se tient entre Na = 2 et Na = 16, et entre K = 0,5 et K = 3,5 ; une petite série de quelques points se place en dehors de ce groupe et correspond aux teneurs en Na comprises entre 8 et 10 mg/l. Ce sont surtout les valeurs trouvées en octobre 1960 qui viennent se placer ici.

La variation mensuelle du rapport $\frac{K}{Na}$ est résumée dans le tableau suivant, dont les valeurs extrêmes ont été exclues.

septembre	1960	0,35 > R > 0,20	Variation	0,15
janvier	1961	0,20 > R > 0,10	—	0,10
février	—	0,25 > R > 0,10	—	0,24
mars	—	0,10 > R > 0,01	—	0,09
avril	—	0,20 > R > 0,01	—	0,19

mai	—	0,25 > R > 0,15	—	0,10
juin	—	0,25 > R > 0,10	—	0,15
juillet	—	0,25 > R > 0,15	—	0,10
août	—	0,22 > R > 0,17	—	0,05
septembre	—	0,20 > R > 0,15	—	0,05
octobre	—	0,31 > R > 0,18	—	0,13
novembre	—	0,21 > R > 0,18	—	0,04
décembre	—	0,25 > R > 0,16	—	0,09

Le rapport $\frac{K}{Na}$ atteint ses valeurs minimales en février, mars et avril et les plus fortes en octobre ; en revanche, c'est en février que les rapports trouvés sont les plus dispersés et en août, septembre et novembre les plus groupés. Il y a toujours une forte prédominance de la quantité de sodium sur celle du potassium.

Le rapport $\frac{Na}{Cl}$ est intéressant par comparaison avec la proportion de ces deux corps dans le sel marin : 23/35, 46 # 0,65 en poids et 1 en équivalents. Je n'ai pas trouvé d'étude de ce rapport dans la littérature. Il serait pourtant très intéressant de considérer la prédominance possible d'un de ces corps sur l'autre, suivant les régions drainées et il y aurait aussi possibilité de mettre ainsi en évidence certains cas de pollution.

A Vézins, le rapport est compris entre 0,9 et 0,45, soit assez régulièrement de part et d'autre de 0,65. En valeurs absolues, le nuage est compris presque entièrement entre 9 mg/l et 16 mg/l pour le sodium et 16 mg/l et 23 mg/l pour le chlore. Il ne ressort pas spécialement de prédominance d'un corps sur l'autre, mais nous retrouvons un phénomène identique à celui signalé à propos de l'étude des rapports précédents, c'est-à-dire la diminution de la valeur du rapport lorsque la teneur de l'un des deux corps, ici le chlore, augmente. C'est ainsi que, si R $\left(=\frac{Na}{Cl}\right)$ est toujours plus petit que 0,9, R < 0,8 pour Cl > 19 mg/l, R < 0,7 pour Cl > 22 mg/l. Deux hypothèses sont possibles :

a) Les apports en chlore ne sont donc pas dus entièrement à un apport de chlorure de sodium à partir de la mer, il y a, en plus, un apport de chlore seul (pollution par Saint-Hilaire-du-Harcouët).

b) Les deux corps sont bien amenés dans la proportion du ClNa, mais le sodium est retenu préférentiellement, soit par action biologique soit par échange d'ions, surtout avec les sols environnants lors du lessivage par les eaux de pluie.

Les variations mensuelles du rapport $\frac{Na}{Cl}$ sont résumées dans le tableau suivant, là aussi les extrêmes ont été volontairement écartés :

octobre	1960	0,60 > R > 0,45	Variation	0,15
janvier	1961	0,67 > R > 0,55	—	0,12
février	—	0,67 > R > 0,56	—	0,11
mars	—	0,90 > R > 0,75	—	0,25
avril	—	0,78 > R > 0,72	—	0,06
mai	—	0,78 > R > 0,67	—	0,11

juin	—	0,80 > R > 0,52	—	0,28
juillet	—	0,65 > R > 0,56	—	0,09
août	—	0,60 > R > 0,52	—	0,08
septembre	—	0,83 > R > 0,75	—	0,08
octobre	—	0,79 > R > 0,68	—	0,11
novembre	—	0,71 > R > 0,62	—	0,09
décembre	—	0,62 > R > 0,55	—	0,07

Le rapport augmente en mars puis diminue jusqu'en août pour remonter en septembre et rediminuer ensuite. Pour 1961, la comparaison avec la pluviométrie indique les précipitations les plus faibles en mars, août et septembre ce qui montre que si une partie du chlore et du sodium est amenée alors à partir de la mer, le lessivage important des terrains entraîne, en fait, une diminution du sodium par rapport au chlore et que le sodium augmente, au contraire, par rapport au chlore, en période sèche, ce qui est en accord avec les généralités exposées au début sur l'échange d'ions des sols vis-à-vis de ces deux corps.

Un autre rapport, qui présente de l'intérêt, est celui des alcalins sur les alcalino-terreux. Généralement, on trouve la distribution suivante : Ca > Mg > Na > K. Rodhe (1949) et, surtout, Gorham (1955) ont montré que quelles que soient leur origine et la nature du bassin, les eaux douces tendaient à arriver à une composition moyenne dans laquelle les principaux cations se répartissaient suivant cet ordre, cette proportionnalité étant due, surtout, au phénomène d'échange d'ions avec les minéraux argileux des sols et des sédiments des eaux douces.

A Vézins, en 1961 spécialement, ce sont presque toujours les cations alcalins qui ont dominé sur les alcalino-terreux. Cela peut s'expliquer : 1° par le cours relativement bref de la Sélune qui ne permet pas à ses eaux, issues de terrains pauvres en calcium aisément mobilisable, de subir l'évolution générale prévisible et 2° par un apport en sodium dont il a déjà été question. La variation mensuelle est intéressante à suivre. En janvier, le rapport $\frac{Na + K}{Ca + Mg}$ est compris entre 1,5 et 1,2. Aucun des résultats d'analyse ne tombe hors de ces valeurs. En février, entre 1,2 et 0,9, avec la valeur trouvée en surface au point 1 tombant isolée à 0,82 ; en mars le rapport remonte et est compris entre 1,6 et 1.2 pour la plus grande partie des analyses. Trois valeurs tombent nettement isolées en dehors du « nuage » correspondant à ce mois, ce sont celles représentant les points 4 et 3 et le point 1 à 11 m de profondeur. Les deux premiers sont entre R = 1 et R = 1,15 et le dernier à R = 1,2, presque exactement le même rapport que le nuage ». « En avril R varie de 1,45 à 1,15, aucune valeur en dehors ; en mai nous trouvons la même limite supérieure au rapport qui descend jusqu'à 1,10, pas de valeur en dehors des limites du « nuage » non plus. En juin, le rapport des cations est essentiellement variable d'un point à l'autre : le « nuage » s'étend de R = 1,6 à R = 1, la valeur correspondante au point 1, sur le fond, tombe très en dehors à R = 0,67 ; en juillet, R varie de 1,1 à 0,9 et aucune valeur ne tombe en dehors de ces limites. Juillet et février sont les deux mois de 1961 où le rapport a été le plus bas, pratiquement voisin de 1. Alors que, depuis mars, le rapport se rapprochait de 1, à partir d'août et jusqu'en décembre il s'en éloigne à nouveau, ce qui est dû plus à un appauvrissement en alcalino-terreux, qu'à un enrichissement en alcalins particulièrement de septembre à décembre. En août, 1,3 > R > 1,05 ; pour le point 1,

la valeur de la surface tombe vers 0,62 à cause d'une très forte teneur en alcalino-terreux tandis que, vers le fond, deux valeurs tombent de part et d'autre de 0,9, bien séparées du « nuage » de points du mois. En septembre, $1,35 > R > 1,10$; les trois valeurs au point 1 des prélèvements effectués le plus près de la surface se groupent en dehors, autour de $R = 1$, en raison d'une valeur légèrement plus forte de Ca + Mg, tandis que les deux teneurs des prélèvements les plus proches du fond correspondent à des rapports compris entre 0,9 et 1 ; il y a moins d'alcalins que dans les couches supérieures. En octobre $1,3 > R > 1,10$ les trois valeurs des prélèvements les plus proches du fond, au point 1, tombent à $R = 0,9$. En novembre, $1,45 > R > 1,3$ pas de valeurs en dehors (mais les dosages, correspondant au point 1 en profondeur, n'ont pas été faits) ; en décembre, $2 > R > 1,6$ pas de valeurs en dehors du « nuage », qui est d'ailleurs nettement formé de deux groupes séparés ; les rapports élevés observés sont dus à une faible teneur en alcalino-terreux. Si nous examinons maintenant les valeurs correspondant à octobre 1960, nous constatons qu'elles tombent très en dehors de celles de 1961 : $0,86 > R > 0,65$, les isolées allant jusqu'à un rapport encore plus faible, 0,45, dû à une augmentation des alcalino-terreux ; elles correspondent au point 4 (pont de Virey) et à certains prélèvements du point 1, en surface et en profondeur.

Nous constatons donc que, d'une année à l'autre, les résultats d'analyses peuvent varier dans d'assez larges limites. Il est probable cependant, que la variation annuelle des rapports doit se retrouver assez bien ; on note aussi que les valeurs isolées ont toujours des rapports plus faibles que la moyenne observée dans le même mois. Ces valeurs correspondent parfois à l'entrée des eaux alors que nous sommes encore en milieu lotique, mais le plus souvent au point où la retenue a le plus la physionomie d'un grand lac, en particulier à proximité du fond en période de stagnation, mais aussi en surface au même point ; ceci se rattache certainement aux phénomènes biologiques dont le lac est le siège. On note que les valeurs du point 0, après la sortie du lac, ne suivent pas celles du point 1 en surface et au fond, mais tombent toujours quand même dans le « nuage » de points, ce qui n'est pas surprenant étant donné la hauteur de la prise d'eau.

Conclusion :

JUDAY, BIRGE et MELLOCHE ayant trouvé que le rapport $\frac{Mg}{Ca}$ diminuait régulièrement avec l'augmentation de la teneur en calcium j'ai pu vérifier cette assertion pour les eaux de Vézins et montrer qu'elle s'applique encore pour des eaux plus riches en calcium que celles étudiées par les auteurs précédents. Le rapport augmente pendant la stagnation et dépasse 1 en septembre 1961.

Pour le rapport $\frac{K}{Na}$ j'ai de même, retrouvé la conclusion des auteurs précédents, diminution du rapport avec l'augmentation du sodium et ceci aussi pour des eaux nettement plus riches en ce corps que celles qu'ils avaient étudié. Ce rapport présente ses plus fortes valeurs en fin de période de stagnation.

Le rapport $\frac{Na}{Cl}$ ne semble pas avoir été encore étudié, il est souvent proche ou identique à la proportion de ces corps dans le sel marin. Lorsque la teneur en chlore augmente le rapport diminue ce qui indique soit un apport particulier de chlore soit une rétention sélective du sodium, ou même l'action conjuguée de ces deux causes.

On constate que le sodium augmente par rapport au chlore en période sèche ; et inversement.

Les proportions relatives des alcalins sur les alcalino-terreux, montrent une prédominance des premiers sur les seconds ce qui est en opposition avec le cas général, deux hypothèses sont émises pour expliquer cette observation.

d) Facteurs physico-chimiques spéciaux

1. *Le pH*

Le pH est une des données physico-chimiques de l'eau mesurées le plus souvent. En particulier, dans les études à propos biologique, on a cru très longtemps que cette notion expliquait, presque à elle seule, l'écologie des êtres aquatiques, ce qui est loin d'être exact.

Le pH, méthode d'expression commode de l'acidité d'une solution, dépend de la quantité d'ions d'hydrogène, H^+, supposé existant à l'état libre dans cette solution. Quelques substances augmentent la concentration des ions hydrogène lorsqu'elles sont dissoutes dans l'eau et, dans les eaux naturelles, c'est le gaz carbonique qui est, de loin, le plus important pour ce rôle ; en effet, il produit une petit quantité d'acide carbonique (H_2CO_3) qui se dissocie. Notons que le gaz carbonique est presque deux cents fois plus soluble dans l'eau que l'oxygène. Accidentellement, il a été trouvé un pH de 1,7 au Katanuma Miyagi, un lac volcanique, en raison de sa teneur en ions sulfate (SO_4^{--}) (Yoshimura, 1934, cité dans Hutchinson [99], 1957); tandis que le maximum observé est pH = 12,0 dans le lac Nakuru au Kenya (Jenkin, 1932, même source). Souvent, on trouve un pH de 4,0 dans les marais à tourbe, ce sont alors surtout des acides organiques qui déterminent ce phénomène. Dans la plupart des cas, les eaux naturelles présentent un pH peu éloigné de la neutralité et le système : CO_2-bicarbonates-carbonates, fonctionne comme tampon de pH. Seules les eaux très calcaires ont un pH très supérieur à 8,00.

Lors des études de limnologie lacustre, on trouve habituellement une diminution faible du pH, avec la profondeur, dans l'hypolimnion pendant la stratification d'été. Dans les eaux très minéralisées, la libération de bicarbonates ferreux et manganeux, à partir du sédiment, peut relever le pH à son contact. La photosynthèse peut aussi entraîner un maximum.

Le pH peut se mesurer assez aisément, sur le terrain, par colorimétrie. Il existe des trousses spéciales permettant ce travail, mais l'adjonction de quelques gouttes de réactif à un petit volume d'eau entraîne, presque automatiquement, un léger décalage du pH réel du liquide étudié, ceci d'autant plus que l'échantillon est moins tamponné, ce qui est justement le cas de Vézins où l'eau est très pauvre en calcium et où le système tampon habituel se trouve donc rapidement inopérant. D'autre part, les anomalies les plus intéressantes, en théorie et en pratique, se rencontreront éventuellement dans l'hypolimnion et au contact du fond, et le simple fait de ramener les eaux de ces niveaux à la surface risque d'entraîner la modification rapide du pH, par déplacement des gaz dissous qui tendront à s'échapper d'autant plus rapidement qu'ils seront en sursaturation, ce qui est prévisible pour le gaz carbonique. En revanche, des gaz de l'air peuvent aussi s'y dissoudre, d'autant plus vite au début qu'ils

sont moins représentés dans l'échantillon en place. Ces raisons incitent, au départ, à éprouver la plus grande défiance vis-à-vis de cette méthode de mesure, surtout pour le cas particulier de Vézins, et militent au contraire en faveur de la deuxième méthode de mesure par un procédé électrique dont le premier avantage est de donner le pH exact sans décalage, puis, de présenter une sensibilité plus grande, indépendante de l'observateur. D'autre part, de nombreux appareils fonctionnent sur piles et sont aisément transportables sur le terrain ; il est possible, en allongeant le câble coaxial relié à l'électrode de verre, d'immerger celle-ci, choisie d'un type convenable, jusqu'à une assez grande profondeur en laissant l'électrode de référence, au calomel, en surface. L'appareil étant préalablement étalonné avec ses électrodes de travail donne le pH au niveau de l'électrode de verre, l'erreur introduite en laissant l'électrode au calomel en surface étant négligeable. Il existe d'ailleurs actuellement, en France, des appareils livrés tout prêts pour travailler dans ces conditions. Il est alors possible de tracer la courbe du pH dans une pièce d'eau, en espaçant les points de mesure d'aussi peu qu'on le désire et, si l'étalonnage a été fait soigneusement, de profiter de la précision maximale.

En 1961, je n'ai relevé que quelques pH en surface, par colorimétrie, en septembre. Au point 4, les eaux arrivant dans le lac présentaient le pH de 6,5, ce sont donc des eaux relativement acides, ce qui était prévisible d'après leur analyse. Au point 3, au contraire, le pH est devenu alcalin : 8,2, ce qui peut être attribué à l'action de la photosynthèse qui se traduit, d'autre part, par un enrichissement en oxygène, d'où consommation de gaz carbonique correspondante et alcalinisation du pH. Au point 2, le pH est retombé à 7,4, il reste donc légèrement alcalin. En 1 : 7,6, soit sensiblement le même étant donné l'imprécision signalée de la méthode de mesure utilisée alors.

En 1962, j'ai pu disposer d'un appareil électrique satisfaisant et j'ai pu relever le pH verticalement, au point 1, 4 fois dans l'année, en mars, juin, septembre et décembre (tabl. 9). En surface, nous assistons à une alcalinisation progressive, de mars à septembre, qui correspond avec le cours du développement de la vie planctonique, puis en décembre, le pH redevient vraiment acide. Sur le fond, les variations sont plus faibles, les valeurs restent cependant légèrement alcalines de mars à septembre et légèrement acides en décembre. L'examen comparatif des variations verticales est faussé à cause de la baisse importante de niveau déjà signalée et qui a été enregistrée ici en juin et septembre. L'examen de chaque courbe reste cependant fort intéressant. En mars, il y a pratiquement identité des pH depuis la surface jusqu'au fond du lac, qui est encore en période de circulation, comme l'attestent les températures relevées simultanément. En juin, la stratification thermique étant établie, nous trouvons une alcalinisation dans les cinq mètres supérieurs, l'augmentation étant de 1 unité pH entre 5 m et 3 m de profondeur. Il y a là un exemple parfaitement net de la variation du pH, sous l'action biologique du plancton. En dessous, le pH varie peu ; il y a cependant un minimum de 13 m à 19 m de profondeur et une légère remontée à proximité du fond. En septembre, où la stratification thermique se traduit par une courbe d'une régularité presque parfaite, les valeurs de pH n'ont pu être relevées que de 5 m en 5 m ; nous retrouvons les variations enregistrées précédemment. En décembre, le lac a repris son niveau normal, il s'est refroidi et la circulation est presque totale. On observe un pH qui augmente très légèrement, mais régulièrement, de la surface au fond, 0,55 unités pH de différence

au total dont 0,15 dans le premier mètre à partir de la surface et 0,2 dans le dernier au-dessus du fond.

En 1963, les mesures ont été prises en avril et poursuivies chaque mois sauf en juin (voir tabl. 10). Nous ne retrouvons pas l'alcalinisation progressive en surface au cours de l'année. Au début, en avril, le pH est acide et ensuite l'alcalinisation est rapide, jusqu'en juillet, où on trouve un pH anormalement haut de 9,35 à 1 m qui ne peut être considéré que comme le résultat de la photosynthèse. Puis le pH redescend, légèrement supérieur à la neutralité, pour remonter un peu, en surface, en octobre à pH 7,8 et à 9,0 en novembre. Si nous examinons maintenant les variations pour les profondeurs moyennes, nous trouvons, jusqu'en août, des pH légèrement acides, avoisinant la valeur de 6,4 ; en septembre le pH est, aux mêmes niveaux, au voisinage de 6,7 et arrive à dépasser 7,5 en octobre. En novembre, il redescend quelque peu mais reste légèrement alcalin.

Sur le fond, au contact de la vase, le pH est alcalin en avril puis, acide de mai à août où il atteint 7,00, il reste ensuite plus ou moins alcalin jusqu'à la fin de l'année. Le pH est toujours plus acide à 1 m au-dessus du fond que sur la vase même. Si nous portons ensuite notre attention sur les variations mensuelles verticales, nous constatons, en avril, une grande irrégularité de la courbe représentative à l'approche du fond ; entre 19 et 21 m, le pH passe de 6,40 à 3,05 et remonte ensuite à 6,5 à 0,50 m du fond. Notons que cette irrégularité est reproduite par la courbe du rH qui pourtant apparaît, en général, très indépendante. Il faut rapporter cette variation aux phénomènes qui correspondent à l'établissement du milieu réducteur dans l'hypolimnion qui se crée à cette époque de l'année. En mai, où l'hypolimnion est bien établi, les variations sont redevenues régulières et la courbe traduit une acidification progressive avec l'approche du fond, il ne persiste qu'un très faible retour dans le sens alcalin au voisinage de la vase. En juillet, même allure générale avec la forte alcalinisation dans les 6 m supérieurs, déjà notée et attribuable à l'action biologique ; cette courbe est à rapprocher de celle de juin 1962. Les courbes des mois suivants sont toutes très irrégulières, le pH devient un peu plus acide en passant dans l'hypolimnion (perte de 0,2 à 0,3 unités pH) et revient vers des valeurs nettement plus alcalines au contact du fond. Le pH de 9,00, trouvé en surface en novembre, est plutôt dû à l'agitation mécanique de l'eau par le vent qu'à une action biologique, car le phytoplancton est assez pauvre à ce moment-là. L'acidification signalée à proximité du thermocline, quoique faible, est remarquable de constance et de netteté depuis août et est même encore visible le 2 décembre. Le 30 décembre, en dessous d'une acidification dans le mètre supérieur, il y a une alcalinisation progressive qui, sur le fond, amène le pH à la neutralité, nous retrouvons le même sens de variation générale qu'en 1962 à la même époque.

Conclusion :

Les variations du pH traduisent les résultats des actions biologiques et des phénomènes thermiques et chimiques qui ont lieu dans le lac de Vézins. Les résultats principaux mis en évidence sont : une forte alcalinisation des eaux de surface aux moments de plus forte croissance du phytoplancton ; toujours une alcalinisation au contact de la vase par rapport à l'eau qui la recouvre à quelques décimètres ; une courbe très irrégulière, lors de l'établissement de la stagnation ; une légère, mais constante, acidification au passage de l'épilimnion dans l'hypolimnion.

2. *Les phénomènes d'oxydo-réduction*

Nettement plus délicats à interpréter que le pH, auquel ils sont d'ailleurs liés, ces phénomènes ont aussi été beaucoup moins étudiés dans les eaux et, s'ils sont maintenant bien connus des chimistes, les biologistes ont pris un certain retard pour les utiliser dans la définition de l'écologie des différentes espèces vivantes. De ce dernier point de vue, les données connues sont encore très rares. En limnologie, c'est surtout Mortimer qui s'est attaché à leur étude.

La méthode la plus généralement utilisée, pour traduire les phénomènes rédox, est de donner simultanément E_H (potentiel d'oxydo-réduction mesuré entre l'électrode de platine et l'électrode du calomel) et le pH, ou de donner le potentiel rédox ramené au pH 7 ($= E_{H\ 7}$). Il est aisé, par le calcul ou en utilisant un abaque, de déduire le rH de Clark des valeurs précédentes.

F. Vlés et ses coll. (1943 [176]) et (1944 [177]) ont montré la possibilité de mesurer directement le rH. Récemment, A. Rivière, avec la collaboration de S. Vernhet (1959 [150]), a réussi à mettre au point un matériel transportable gradué directement en rH qui est, maintenant, commercialisé en France ; c'est un de ces appareils que j'ai utilisé (J. Ponselle, constructeur, Versailles). Il est démontré que le rH trouvé est bien celui de Clark et qu'il suffit, à lui seul, à caractériser l'état d'oxydo-réduction du milieu. La planche 3 permet de passer aux autres représentations ; pour la tracer, j'ai fait les calculs afin de l'établir pour 18°C, température qui a plus la valeur de moyenne en limnologie que les 30°C utilisés en général.

A Vézins, les mesures du rH, comme celles du pH, n'ont pu être faites qu'à partir de 1962 et elles ont été limitées au point 1 (tabl. 9).

En mars 1962, les variations enregistrées verticalement se sont révélées très faibles, avec seulement une diminution brutale dans le dernier mètre, au contact de la vase où le rH est passé de 27,3 à 25,6, soit 1,4 unités de moins (donc dans le sens d'un état plus réducteur). Le rH, en surface, était alors de 27,7.

En juin, nous trouvons une remontée très importante du rH à partir de la surface (30), passant par un maximum à 3 m de profondeur (30,4), s'établissant à 29,4 de 5 m à 11 m, valeur remontant légèrement au niveau inférieur pour redescendre ensuite brutalement entre 5 m et 3 m du fond (passage de 29,4 à 23,8), la diminution étant la plus marquée entre 3 m et 2 m du fond (4,2 unités).

En septembre, bien que les mesures n'aient pu être faites que de 5 en 5 m, on relève une très grande irrégularité. En surface, le rH est inférieur à celui relevé en juin. Nous enregistrons une diminution qui paraît régulière, compte tenu du petit nombre de mesures relevées, jusqu'à 15 m du fond où rH = 23. Entre ce point et le fond où rH = 23,2, sensiblement à mi-hauteur, le rH est remonté jusqu'à une valeur presque égale à celle de la surface, = 27,7 à 21 m. (Rappelons que de juin à septembre 1962, le niveau du lac a subi une baisse importante de caractère accidentel dans les variations normales de ce lac).

En décembre, la courbe semble inversée, c'est-à-dire que le rH augmente assez régulièrement depuis la surface (rH = 32) jusqu'à 1 m du fond (rH = 36,9) ; une très légère baisse dans le dernier mètre donne rH = 36,3, donc un rH restant bien supérieur à celui de la surface.

En 1963, le rH a été relevé, comme l'année précédente, en même temps que

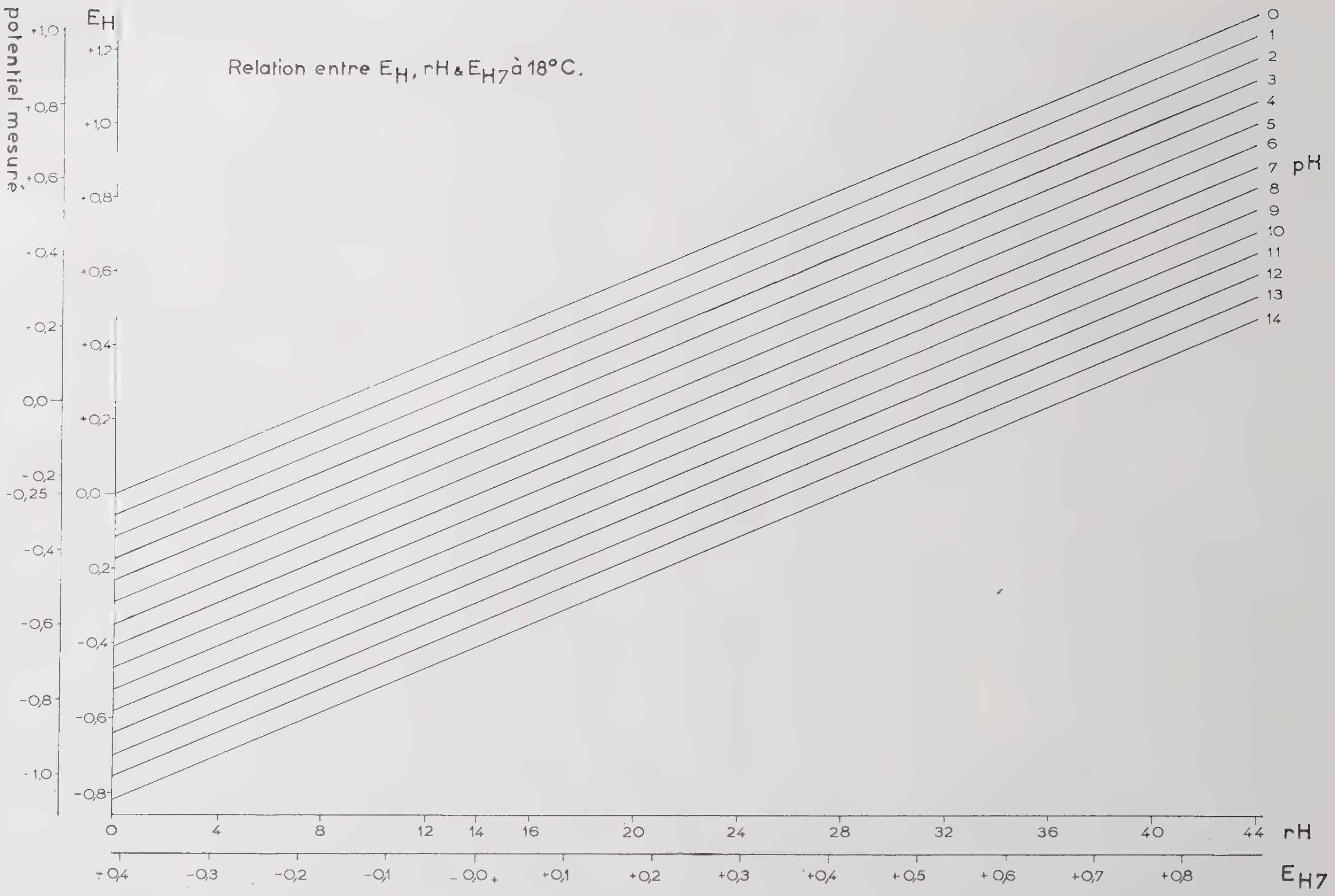

Planche 3. — *L'abaque a été tracé pour la température de 18°C, valeur moyenne en limnologie. Le potentiel de départ est celui mesuré effectivement entre l'électrode de platine et celle au calomel.*

le pH ; nous avons, d'avril à décembre, les relevés mensuels faits m par m (tabl. 10). Comme en 1962, les rH varient de façon beaucoup moins régulières que les pH. En avril, où le pH est lui-même irrégulier, nous trouvons des rH allant de 33 en surface vers des valeurs plus oxydantes, 35,5 à 18 m de profondeur, en dessous il y a une brusque diminution, rH = 28,8 à 21 m, puis une remontée vers rH = 35 et un retour à rH = 33 sur le fond. En mai, quoique très irrégulière dans le détail, la courbe montre une variation très continue dont le résultat d'ensemble est d'amener le rH de 33 en surface à 35 à 1 m du fond sur lequel le rH retombe à 32,6. En juillet, la courbe traduit la plus grande variation que j'ai pu enregistrer. Le rH de surface étant de 32 descend à 3,5 à 20 cm de la vase ; cette variation se fait avec un palier vers 11,50 m de profondeur légèrement supérieur à celui du thermocline, mais, en plus, on enregistre à 19 m une remontée de 20 unités rH, limitée à une strate extrêmement réduite d'eau. Cette variation est tellement surprenante au premier abord, qu'après avoir relevé les pH et rH mètre par mètre jusqu'au fond, j'ai remonté mes électrodes en laissant l'appareil branché sur la lecture du rH ; le galvanomètre a enregistré à nouveau cette anomalie exactement au même niveau ; en revanche, cette discontinuité échappe totalement au pH pour lequel c'est seulement, en partie, la zone la plus acide, mais fort peu marquée. Par comparaison avec les dosages verticaux du fer, conduits en même temps par M. Feuillade ([58] 1964), on constate qu'il y a correspondance avec la plus forte teneur en fer.

Les courbes suivantes sont assez semblables entre elles, comme l'étaient déjà celles du pH ; elles marquent ainsi que la stabilité est bien atteinte et que les phénomènes de dissolution et d'échanges chimiques sont arrivés à un état proche de l'équilibre, qui n'est plus marqué que par des modifications lentes et régulières. Le rH, en surface, est toujours proche de 30 à 36 ; il descend relativement lentement jusque vers 26 à 34, à quelques mètres du fond, et ensuite il y a toujours une chute l'amenant vers 20 à 26, avec une perte de plusieurs unités sur le fond ou à sa proximité immédiate. En décembre, nous retrouvons une baisse superficielle du rH mais, en dessous, la remontée des valeurs est régulière, alors que nous sommes, d'après les températures relevées, en période de circulation totale ; le rH est encore bien stratifié, indiquant un milieu plus oxydant vers le fond.

L'interprétation de ces courbes reste délicate. En premier lieu, en dehors des données de A. Rivière dans sa note, il ne semble pas y avoir d'études limnologiques pour lesquelles le rH ait été donné directement. Au mieux, on trouve quelques relevés donnant E_{H7} (E_H ramené à pH 7) qui permettent alors de calculer le rH avec la formule classique de Clark, mais plusieurs auteurs semblent avoir donné le potentiel de l'électrode de platine brillant sans avoir rapporté, simultanément, le pH, ce qui rend tout essai de comparaison impossible. D'ailleurs, les phénomènes d'oxydo-réduction, dans les eaux douces naturelles, lorsqu'ils ont été étudiés, l'ont souvent été avec des méthodes peu précises et peu fidèles.

Il est admis que, dans les lacs d'une importance moyenne et grande, c'est la teneur en oxygène qui conditionne surtout les valeurs trouvées dans l'épilimnion. En revanche, dans l'hypolimnion, les phénomènes sont nettement plus complexes et la présence de substances réductrices dissoutes influe naturellement sur le rH. En raison de l'importance du fer dans les eaux douces et du fait que, normalement, le fer est ferrique, et insoluble au-dessus de rH = 20,7 (0,2 volts à pH 7), et ferreux et très soluble pour un rH inférieur, c'est la substance dont les phénomènes d'oxydo-

réduction ont été les plus étudiés. D'après MORTIMER, dans le lac Esthwaite Water, le niveau correspondant à rH 20,7 se trouve vers la vase du fond pendant la période de circulation et sous la glace, et remonte au thermocline en période de stagnation estivale. Notons qu'à Vézins il n'a été relevé de rH aussi bas qu'en juillet 1963, bien que l'étude de 1961 nous ait déjà montré de grosses quantités de fer présentes sous le thermocline et, surtout, au voisinage du fond pendant la stagnation. La forme exacte sous laquelle le fer était présent n'ayant pas été identifiée avec certitude, il n'y a pas là incompatibilité absolue des résultats.

Notons encore que :

NO_3^- devient NO_2^- entre rH = 29 et rH = 27,11
NO_2^- devient NH_3 entre rH = 27,11 et rH = 25,66
SO_4^{--} devient S^{--} entre rH = 17,33 et rH = 16
(il y a alors formation de SH_2)

MORTIMER indique rH 30,66 pour valeur moyenne des eaux de surface aérées, A. RIVIÈRE donne des valeurs de 30 à 32 pour des eaux pures aérées et agitées.

L'étude du rH est particulièrement intéressante dans les sédiments, pour la compréhension des phénomènes d'échanges vase-eau par exemple, et les expériences rapportées en 4e partie, pour la reproduction de la précipitation ferrugineuse dans les conditions du lac, apportent des lumières pour l'interprétation, à Vézins au moins, des rH relevés sur place.

Une courbe de rH d'allure irrégulière, comme celle relevée en septembre 1962, peut se rapprocher de la courbe du fer en octobre 1961 où la plus forte teneur n'était pas au fond, mais à un niveau plus élevé. (Notons que le prélèvement de l'eau sur le fond était effectué à 50 cm de celui-ci, par relèvement de la bouteille avant sa fermeture, tandis que la mesure rH du fond était faite les électrodes posées sur la vase).

Nous constatons qu'en surface le rH s'établit, en général, un peu au-dessus de 32 et peut atteindre 36,3 lorsque les conditions telles que l'abondance du phytoplancton, ou une certaine agitation, sont particulièrement favorables à l'oxygénation et que la température est relativement basse, d'où sursaturation importante en oxygène.

En ne considérant, plus spécialement, que les courbes obtenues en 1963, où le niveau est resté constant et où nous avons bénéficié d'une stratification thermique très régulière et établie très tôt, nous pouvons faire ressortir encore quelques observations très intéressantes. Jusqu'en mai, la courbe a plutôt tendance à montrer un rH augmentant de la surface jusqu'à une grande profondeur. En juillet le rH baisse dès la surface et accuse fortement le passage du niveau correspondant au thermocline. Ensuite, et même encore en novembre, le niveau du thermocline apparaît de façon plus ou moins nette, mais toujours dans cette courbe de rH, par une augmentation du gradient (j'appelle ainsi ici la variation du rH par mètre) ; graphiquement, la courbe devient alors plus inclinée. Ceci traduit bien les conditions réductrices existant alors dans l'hypolimnion. En revanche, au même niveau, une mesure unique de rH ne peut seule indiquer cet hypolimnion, car il semble y avoir des variations importantes en valeurs absolues.

Considérons, maintenant, l'épaisseur d'eau prise dans l'hypolimnion, au-dessus

des couches les plus réductrices, soit entre les cotes 35 et 43. Calculons les « rH moyens », pour cette eau, que nous portons dans le tableau suivant :

TABLEAU 15

1962 :				1963								
mars :	juin	sept.	déc.	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
27,2 :	29,6	23,0	36,5	33,3	35,0	—	9,7	30,0	27,3	34,2	34,3	33,8

Si nous examinons alors le graphique correspondant (pl. n° 4), nous constatons des variations qui se succèdent dans le même ordre. En début d'année, le

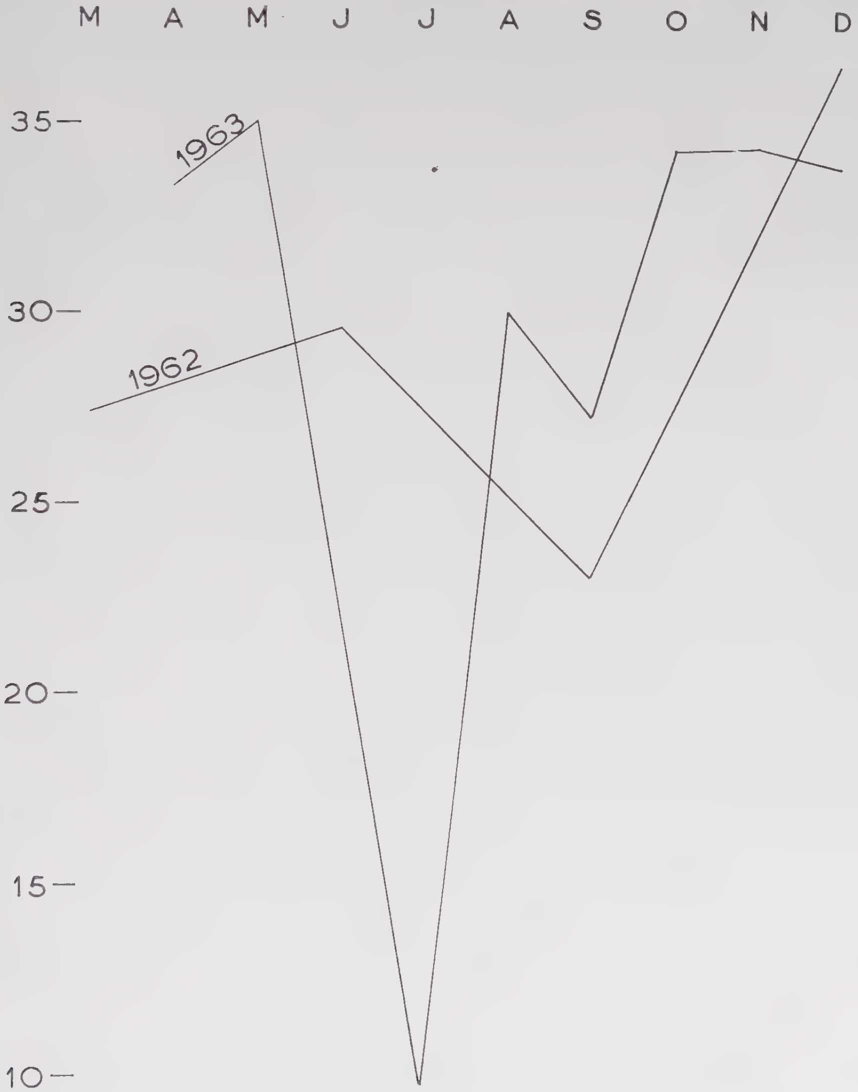

PLANCHE 4. — *Variation du rH moyen dans l'hypolimnion à plus de 5 mètres de la vase.*

rH augmente un peu, au niveau considéré, ceci correspond à la diminution de l'oxygène dissous. Ensuite le rH baisse fortement, à ce moment il n'y a plus d'oxygène disponible et les composés qui apparaissent alors (provenant de l'action bactérienne anaérobie) manifestent un pouvoir réducteur qui peut être qualifié d'agressif, entraînant une dissolution du fer de plus en plus importante au niveau du plus faible rH, niveau qui se déplace vers le bas, jusqu'au contact de la vase où se retrouve alors la plus forte teneur en fer. Dans les couches sur lesquelles porte le calcul précédent, il y a, pendant cette période, une remontée du rH qui se poursuit sans transition lorsque la circulation se rétablit en fin d'année.

Au fond du lac, jusqu'à la vase, le rH descend brusquement sur toute l'épaisseur de l'eau où la teneur en fer est forte ; là aussi, si cette portion de la courbe traduit bien la zone riche en fer, il n'y a pas non plus de relation mathématique simple entre le rH trouvé et la teneur. Le fer augmente de juillet à octobre et diminue ensuite, sans qu'un rapport direct apparaisse avec le rH enregistré.

Conclusion :

Il a été mis en évidence que s'il y avait peu de rapports directs entre les valeurs absolues du rH relevé sur le terrain et une quelconque valeur chimique, l'allure générale des courbes du rH est cependant révélatrice de l'état du lac presque aussi bien et même mieux, parfois, pour le fer par exemple, que celle des courbes de la température.

TROISÈME PARTIE

LES FACTEURS BIOLOGIQUES

A. Le plancton

Des prélèvements de plancton ont été effectués dès le premier passage sur le lac en septembre 1960. En 1961 les prises ont été faites régulièrement de mois en mois, à chacun des quatre points situés sur la retenue de Vézins, en surface et à l'aide d'un filet fin à mailles de 48 microns. En 1962 les prises ont été faites au point 1 seulement et en mai, juin, septembre et décembre. En 1963 l'étude a été reprise chaque mois au point 1, à partir du dégel de la surface du lac (en mars), en surface, avec le filet fin mais aussi en prélevant un volume connu d'eau dont la totalité du plancton était isolée pour l'étude par concentration sur filtre, cette dernière méthode qui n'est pas applicable au zooplancton bon nageur donne en revanche des résultats quantitatifs très précis avec le microplancton, soit le phytoplancton principalement. En même temps, en 1963, Mme FEUILLADE a bien voulu procéder par la même technique de prélèvements volumétriquement connus, au dénombrement du phytoplancton verticalement, au point 1, ce travail qui doit être publié à part a donné des résultats très intéressants à comparer avec les résultats d'ensemble que j'ai moi-même obtenus pour la physico-chimie du lac.

Pour sa conservation le plancton a été fixé au formol ou au lugol, le formol très étendu étant finalement seul conservé, le deuxième liquide n'ayant pas apporté les avantages qui avaient été espérés. En raison de l'imprécision de la méthode de pêche au filet fin, avec le type de filet que j'ai pu employer, les données pour 1960, 61 et 62 n'ont de valeur que pour la comparaison des proportions relatives des différents organismes identifiés.

Je dois signaler que du 15 novembre au 21 septembre 1961-1962 des récoltes mensuelles de plancton à l'aide de filets à mailles fines construits pour l'étude en mer et traînés grâce à un bateau à moteur puissant, ont été faites par J. HIRT pour un diplôme d'études supérieures qu'elle a mené à bien sous la direction de M. C. BOCQUET, professeur de Zoologie à l'Université de Caen. Le type de filet employé et les conditions d'utilisation ont permis à cet auteur de donner des résultats quantitatifs valables pour la surface du lac et la période d'étude (J. HIRT [88] 1962).

a) LE PHYTOPLANCTON

1. *Étude chronologique des récoltes*

Le 20 septembre 1960, au barrage, la récolte a été faite du bord : *Ceratium hirundinella* domine, les exemplaires appartiennent à la forme *furcoïdes*, en nombre égal nous trouvons aussi *Fragilaria crotonensis*, ceci bien que chaque cellule de

Fragilaria soit beaucoup plus petite que celle des *Ceratium*, ce qui fait qu'au premier abord on soit tenté de sous-estimer le nombre exact des cellules de la diatomée. En quantité beaucoup moins importante nous avons ensuite : *Aphanizomenon flos-aquae, Coelosphaerium naegelianum, Anabaena spiroïdes, Microcystis flos-aquae*, cette dernière en quantité encore plus faible, et aussi, mais rares : *Staurastrum, Asterionella formosa* et *Eudorina elegans*.

Au pont des Biards, il y avait une fleur d'eau à *Microcystis aeruginosa*, mais j'ai également pu trouver de nombreux exemplaires de l'espèce *flos-aquae ; Ceratium hirundinella* était très abondant, ensuite, *Coelosphaerium naegelianum, Fragilaria crotonensis* et *Aphanizomenon flos-aquae* étaient bien représentés, enfin, en quantité plus faible ou rare, *Anabaena spiroïdes* et *Staurastrum*.

Au pont de la République, il y avait aussi une fleur d'eau mais ici avec la dominance des *Ceratium hirundinella* sur les *Microcystis*, ceux-ci surtout sous l'aspect de l'espèce *aeruginosa*, en plus, il y avait quelques rares exemplaires de : *Aphanizomenon flos-aquae, Anabaena spiroïdes* et de *Melosira*.

Le 28 octobre 1960, au barrage, il y avait toujours une très grande quantité de *Ceratium hirundinella*, accompagnée d'ailleurs de nombreux kystes appartenant au même genre d'algue, venait ensuite *Anabaena spiroïdes*, puis *Coelospharium naegelianum* et *Fragilaria crotonensis*, mais en moins grande proportion que le mois passé ; en petite quantité : *Microcystis flos-aquae* surtout et *M. aeruginosa* très peu représenté. Rares : *Synedra ulna, Melosira italica, Aphanizomenon flos-aquae* et *Eudorina elegans*.

Au pont des Biards le filet à plancton ramenait une très forte proportion de débris morts et inorganiques qui se trouvaient en suspension dans l'eau (tripton), proportion pouvant être évaluée à environ la moitié de la prise totale, celle-ci étant plus réduite, en masse que le mois passé. En plus de ce tripton de nombreux filaments de la bactérie d'eau polluée *Sphaerotilus natans* sont notés en premier lieu. Comme cela se trouve en général chaque fois qu'un plancton est pauvre en individus il est plus riche en espèces qu'un plancton de fleur d'eau, la présente liste n'échappe pas à la règle. *Fragilaria crotonensis* domine encore, nous trouvons ensuite : *Melosira italica, M. granulata, Coelosphaerium naegelianum, Anabaena spiroïdes* et *Ceratium hirundinella furcoïdes* ainsi que des kystes de *Ceratium*. Les espèces suivantes sont rares : *Synedra ulna, Staurastrum* sp., *Synura uvella, Mallomonas fastigata, Gomphonema parvulum, Microcystis, Pediastrum duplex* var. *reticulatum* et des débris de *Surirella*.

Au pont de la République, la proportion du tripton atteignait près des 9/10 de la récolte totale et toutes les espèces trouvées pouvaient être qualifiées de rares : *Navicula radiosa, Sphaerotilus natans, Synedra ulna, Anabaena spiroïdes, Melosira varians, Microcystis flos-aquae, Coelosphaerium naegelianum, Ceratium hirundinella, Oscillatoria* sp., et des débris de *Surirella*.

Le 25 janvier 1961, au barrage, le plancton apparaissait pauvre, *Fragilaria crotonensis* dominait largement, puis il y avait : *Melosira italica* et *Synedra ulna ;* ensuite en moins grande quantité : *Staurastrum* sp., *Asterionella formosa ;* et plus ou moins rares, voir accidentelles : *Coelosphaerium naegelianum, Pediastrum duplex, Microcystis aeruginosa* et *Ceratium hirundinella*.

Au pont des Biards, plancton très pauvre en individus mais riche en espèces, en plus d'un tripton relativement abondant, *Fragilaria crotonensis* et *Melosira italica*

sont assez bien représentées, puis ensuite : *Synedra ulna, M. granulata, Pinnularia gibba, P. interrupta, Asterionella formosa, Navicula* (*placenta* EHR. ?), *N. radiosa, Tabellaria fenestrata, T. floculosa, Frustulia rhomboïdes* var. *amphipleuroïdes, Staurastrum, Melosira varians, Surirella robusta, Cymbella* sp., *Cocconeis pediculus, Eunotia pectinalis* var. *ventralis, Microcystis flos-aquae, Nitzschia recta, Pediastrum duplex, Anabaena spiroïdes, Gomphonema acuminatum* var. *coronata, G. ventricosum, G. constrictum.*

Au pont de la République, mélangés à un tripton représentant environ la moitié de la prise, il n'y avait que quelques filaments de *Sphaerotilus natans* et là aussi de nombreuses espèces de diatomées représentées chacune par seulement de très rares exemplaires : *Gomphonema constrictum, Surirella robusta, S. capronii, Navicula radiosa, Synedra ulna, S. parasitica* var. *subconstricta, Cocconeis, Pinnularia, Melosira varians, M. granulata, M. granulata* var. *muzzanensis* (un seul exemplaire), *Fragilaria crotonensis, Gomphonema parvulum, G. longiceps, Melosira italica, Eunotia* (*lapponica ?*), *Tabellaria fenestrata.*

Au pont de Virey, une pêche a aussi été réalisée avec le filet fin, la récolte ne contient pratiquement que des débris, d'origine minérale principalement, et de très rares diatomées : *Melosira, Synedra* et *Navicula* sp. L'apport de plancton dans le lac à partir de la Sélune, semble extrêmement faible.

Le 28 février 1961, au barrage, le plancton apparaît encore plus pauvre que le mois précédent. La proportion du tripton est de 65 p. 100, ce qui est rare en ce point et correspond au vent violent qui soufflait alors sur le lac. Il y avait principalement : *Melosira italica* et *Fragilaria crotonensis*, puis *Asterionella formosa*, et en quantité très faible : *Synedra ulna, Melosira varians, Oscillatoria* sp., *Staurastrum, Microcystis aeruginosa, Pediastrum, Closterium, Tabellaria floculosa, Eudorina elegans* et *Merismopedia tenuissima ;* ces quatre dernières étant accidentellement représentées par un seul exemplaire sur plusieurs lames observées.

Au pont des Biards il n'y avait aussi qu'un plancton très pauvre et 65 p. 100 de tripton dans la récolte. En commençant par les espèces les mieux représentées nous avons : *Fragilaria crotonensis* qui est nettement dominante, puis *Melosira italica, M. granulata*, et beaucoup plus rares : *Synedra ulna, Melosira varians, Surirella robusta, Gomphonema parvulum, G. acuminatum, Navicula radiosa, Oscillatoria* sp., *Staurastrum, Synura uvella, Ceratium hirundinella, Synedra acus, Microcystis flos-aquae, M. aeruginosa, Closterium* sp., *Coelosphaerium naegelianum*, et *Pediastrum* sp.

Au pont de la République, 95 p. 100 de tripton et de nombreuses espèces représentées par un très petit nombre d'individus : *Asterionella formosa, Synedra ulna, Melosira italica, M. varians, M. granulata, Tabellaria fenestrata, Navicula radiosa, Cocconeis placentula, Synedra parasitica* var. *subconstricta, Pinnularia acrosphaeria, Eunotia pectinalis* var. *ventralis, Nitzschia* sp., *Dinobryon divergens, Closterium leibleimanii, Gomphonema constrictum, G. parvulum, Surirella capronii, S. robusta, Tabellaria floculosa* et *Oscillatoria* (*limosa ?*). *Sphaerotilus natans* est encore présente.

Au pont de Virey, 98 p. 100 de tripton et seulement quelques rares diatomées : *Navicula hungarica, Melosira italica, Surirella* (*linearis ?*).

Le 23 mars nous retrouvons au barrage un plancton beaucoup plus riche qu'en février, ce plancton était dominé par *Eudorina elegans*, viennent ensuite : *Asterionella formosa, Melosira italica*, puis *Fragilaria crotonensis*, et plus rares : *Mallomonas* sp.,

Pandorina morum, Dinobryon divergens, Melosira varians, Synedra ulna, Scenedesmus dimorphis, Sc. quadricauda, Synura uvella, Peridinium sp., *Tabellaria floculosa, Ceratium hirundinella, Anabaena spiroïdes* et une Cyanophycée filamenteuse appartenant peut-être au genre *Oscillatoria.*

Au pont des Biards, il y avait environ 30 p. 100 de tripton ; dominaient : *Melosira italica* et *Asterionella formosa,* puis *Eudorina elegans, Fragilaria crotonensis, Synura uvella, Dinobryon divergens,* en moins grand nombre nous avons : *Ceratium hirundinella furcoïdes, Pandorina morum, Peridinium cinctum.* La bactérie *Sphaerotilus natans* était encore fréquente et les espèces suivantes d'algues étaient plus ou moins rares : *Synedra ulna, Scenedesmus quadricauda, Dinobryon bavaricum, D. cylindricum, Mallomonas* sp., *Melosira varians, Pediastrum duplex, Closterium* sp., *Microcystis flos-aquae, Coelosphaerium naegelianum, Oscillatoria* (*limosa ?*).

Au pont de la République, le tripton atteint encore la proportion de 80 p. 100, *Sphaerotilus natans* est encore présente, la liste des algues en partant des plus fréquentes s'établit ainsi : *Melosira italica* est l'espèce dominante, puis *Fragilaria crotonensis, Melosira varians, Navicula radiosa, Pinnularia gibba, P. gentilis, P. appendiculata, Cymbella* sp., *Nitzschia* sp., *Synedra ulna, Gomphonema constrictum, G. parvulum, G. acuminatum* var. *coronata, Surirella robusta, Rhoicosphenia curvata, Tabellaria fenestrata, T. floculosa, Cocconeis placentula, Eunotia pectinalis, Asterionella formosa, Aphanizomenon flos-aquae, Oscillatoria* sp., *Gomphonema longiceps.*

Au pont de Virey, avec 95 p. 100 de tripton, on repère surtout de nombreux filaments bactériens de *Sphaerotilus natans,* ainsi que quelques exemplaires de *Melosira varians* et de *Surirella robusta,* et quelques *Navicula* p. sp.

Le 20 avril 1961, au barrage, le zooplancton était dominant mais il y avait aussi une très grande quantité de grains de pollen de pin. *Sphaerotilus natans* était encore présente par de nombreux exemplaires, les algues n'étant qu'en faible quantité. Dominance de *Fragilaria crotonensis,* puis *Melosira italica,* en moins grand nombre *Asterionella formosa, Ceratium hirundinella, Aphanizomenon flos-aquae, Anabaena spiroïdes,* rares : *Synedra ulna, Microcystis aeruginosa, Oscillatoria limosa, Tabellaria fenestrata, Staurastrum planctonicum, Navicula radiosa, Cymbella, Eudorina elegans, Gloeococcus schroeteri, Dictyosphaerium ehrenbergianum, Surirella robusta, Coelosphaerium naegelianum.*

Au pont des Biards, existait la même dominance du zooplancton (protozoaires et rotifères) sur le phytoplancton, *Sphaerotilus natans* était aussi abondante, tandis que les algues n'étaient représentées que par assez peu d'individus : *Melosira italica* domine, puis *Fragilaria crotonensis, Asterionella formosa, Ceratium hirundinella furcoïdes,* en moins grand nombre : *Anabaena spiroïdes, Melosira granulata, M. varians, Scenedesmus tetradesmiformis, Sc. spinosus, Dinobryon divergens, Coelosphaerium naegelianum, Microcystis flos-aquae, M. aeruginosa, Pediastrum duplex* var. *reticulatum.*

Au pont de la République, le plancton avait été récolté la veille, le 19, le zooplancton était aussi le plus abondant mais composé surtout par des rotifères et quelques crustacés, il n'y avait plus que quelques pour cent seulement de tripton, ce qui représentait une assez grosse différence par rapport aux mois précédents. Comme algues, toujours en partant des plus fréquentes, nous avions la liste suivante : *Melosira italica* bien en tête, puis *Dinobryon divergens, D. bavaricum, Fragilaria crotonensis, Dinobryon cylindricum, Ceratium hirundinella,* en moins grand nombre :

Peridinium cinctum, Scenedesmus quadricauda, Coelosphaerium naegelianum, Navicula radiosa, rares : *Melosira varians, Pinnularia appendiculata, Oscillatoria limosa, Surirella robusta, Anabaena spiroïdes, Spirulina* sp. La bactérie *Sphaerotilus natans* étant elle toujours bien représentée.

Au pont de Virey, le même jour, nous avions 95 p. 100 de tripton, une grande quantité de *Sphaerotilus natans*, des *Navicula* sp., *Melosira varians* et *M. italica*.

Le 18 mai 1961, au barrage, existait un plancton où les animaux dominaient encore, *Sphaerotilus natans* était encore abondante, nous avions ensuite : *Asterionella formosa, Melosira italica, Fragilaria crotonensis, Microcystis flos-aquae, Oscillatoria limosa*, puis en quantité plus faible : *Microcystis aeruginosa, Anabaena spiroïdes, Ceratium hirundinella, Pediastrum duplex* var. *reticulatum, Synedra ulna*, rares : *Coelosphaerium naegelianum, Aphanizomenon flos-aquae, Volvox globator, Tabellaria fenestrata, Dinobryon divergens, Scenedesmus quadricauda, Mallomonas* sp.

Au pont des Biards aussi le zooplancton dominait largement, les algues étaient peu représentées : *Aphanizomenon flos-aquae, Microcystis aeruginosa, Gloeococcus schroeteri*, rares : *Pediastrum duplex, Mallomonas fastigata, Coelosphaerium naegelianum, Surirella robusta, Asterionella formosa, Volvox globator*, et *Anabaena circinalis* accidentelle.

Au pont de la République, le zooplancton, principalement de cladocères était encore dominant, mais il y avait aussi une grande quantité de diatomées : *Asterionella formosa* était abondante, puis *Melosira italica, M. varians, Kirchneriella obesa, Mallomonas fastigata, Eudorina elegans, Oscillatoria limosa*, et une autre Oscillaire : *Oscillatoria* sp. (*simplicimus* GOUR. *?*), *Peridinium cinctum, Fragilaria crotonensis, Navicula radiosa, Synedra ulna, Synura uvella, Dinobryon divergens, Staurastrum, Pediastrum duplex, Ceratium hirundinella, Scenedesmus quadricauda*, rares : *Surirella robusta, Tabellaria floculosa, Nitzschia, Gloeococcus schroeteri, Peridinium pseudolaeve, Rhoicosphenia curvata, Cocconeis placentula, Dictyosphaerium pulchellum.*

Au pont de Virey, la proportion du tripton atteignait 98 p. 100, *Sphaerotilus natans* était encore bien représentée, puis *Navicula* sp., les autres espèces étaient accidentelles : *Melosira varians, M. italica, Synedra ulna, Synura uvella, Scenedesmus quadricauda, Closterium* sp.

Le 19 juin au barrage, le zooplancton apparaissait en régression sur le mois passé, nous trouvions en revanche une algue qui dominait largement par son abondance : *Asterionella formosa*, ensuite en quantité de moins en moins importante : *Synedra ulna, Fragilaria crotonensis, Melosira italica, Gloeococcus schroeteri, Microcystis flos-aquae, Aphanizomenon flos-aquae, Staurastrum planctonicum, Anabaena spiroïdes, Ceratium hirundinella*, rares : *Microcystis aeruginosa, Merismopedia tenuissima, Melosira varians, Pediastrum duplex* var. *reticulatum, P. boryanum, P. tetras, Oscillatoria limosa, Volvox aureus, Coelastrum microporum, Eudorina elegans, Pandorina morum, Scenedesmus quadricauda, Coelosphaerium naegelianum, Kirchneriella lunaris, Nephrocytium agardhianum, Dictyosphaerium pulchellum.* On trouvait encore quelques *Sphaerotilus natans.*

Au pont des Biards, nous retrouvions la dominance d'*Asterionella formosa* dans le phytoplancton, nous avions ensuite : *Aphanizomenon flos-aquae, Synedra ulna, Fragilaria crotonensis, Microcystis flos-aquae, Melosira italica, Staurastrum planctonicum, Gloeococcus schroeteri, Ceratium hirundinella, Anabaena spiroïdes, Dictyosphaerium pulchellum*, en petit nombre, voire rares : *Pediastrum duplex* var. *reticu-*

latum, Dinobryon divergens, Coelosphaerium naegelianum, Oscillatoria limosa, Kirchneriella lunaris, Botryococcus braunii, Scenedesmus quadricauda, Volvox aureus, Scenedesmus dimorphus, Pandorina morum, Microcystis aeruginosa, Surirella robusta.

Au pont de la République, *Melosira italica* et *Asterionella formosa* étaient les deux espèces dominantes. Puis *Synedra ulna, Aphanizomenon flos-aquae, Microcystis flos-aquae, Melosira varians, Staurastrum planctonicum,* en petit nombre : *Pediastrum duplex, Scenedesmus quadricauda, Fragilaria crotonensis, Eudorina elegans, Coelastrum microporum, Pandorina morum, Mallomonas, Dictyosphaerium ehrenbergianum, Ceratium hirundinella, Anabaena spiroïdes, Navicula radiosa, Oscillatoria limosa.* Rares : *Closterium leibleinii, Lyngbya hieronymusii, Gloeococcus schroeteri, Tabellaria floculosa, Volvox aureus, Scenedesmus dimorphus, Sphaerotilus natans* était encore présente à de nombreux exemplaires.

Au pont de Virey, il y avait 95 p. 100 de tripton, *Sphaerotilus natans* était bien représentée, nous trouvions ensuite : *Microcystis flos-aquae, Navicula elegans, N. p.* sp. puis de rares *Synedra ulna, Melosira varians, Oscillatoria limosa, Asterionella formosa,* et accidentelles : *Closterium* sp., *Pediastrum duplex, Scenedesmus quadricauda, Eudorina elegans, Staurastrum* sp., *Pinnularia* sp. (*viridis ?*).

Le 24 juillet 1961, au barrage, dans le phytoplancton c'était *Ceratium hirundinella* type *robustum* qui dominait, associé à *Staurastrum planctonicum* et *St. sebaldii, Gloeococcus schroeteri* et *Asterionella formosa.* Nous trouvions ensuite : *Microcystis flos-aquae, M. aeruginosa, Coelosphaerium naegelianum, Anabaena spiroïdes, Botryococcus braunii, Pediastrum duplex* var. *clathratum, Sphaerotilus natans* était rare.

Au pont des Biards, *Microcystis flos-aquae* dominait dans le phytoplancton, puis *Ceratium hirundinella furcoïdes, C. hirundinella robustum, Microcystis aeruginosa, Anabaena spiroïdes, Staurastrum planctonicum, St. sebaldii, Gloeococcus schroeteri, Asterionella formosa, Aphanizomenon flos-aquae.* Plus rares : *Melosira italica, Synedra ulna, Pediastrum duplex, P. boryanum, Eudorina elegans, Scenedesmus quadricauda. Sphaerotilus natans* était très abondante dans ce plancton.

Au pont de la République, nous trouvions une fleur d'eau à *Anabaena spiroïdes,* et une grande quantité de *Sphaerotilus natans.* Nous avions ensuite : *Melosira italica, Microcystis flos-aquae,* et en quantité moins importante : *Ceratium hirundinella furcoïdes, Coelosphaerium naegelianum, Gloeococcus schroeteri, Eudorina elegans, Scenedesmus quadricauda, Pediastrum duplex, Peridinium cinctum, Melosira granulata,* encore plus rares : *Peridinium pseudolaeve, Mallomonas, Navicula radiosa, Synedra ulna, Melosira varians, Tabellaria floculosa, Nitzschia, Rhoicosphenia curvata, Cocconeis placentula, Staurastrum planctonicum, Ankistrodesmus falcatus, Pediastrum tetras, Dictyosphaerium pulchellum, Pandorina morum, Scenedesmus dimorphus, Fragilaria crotonensis.*

Au pont de Virey, la proportion de tripton était beaucoup plus faible que les mois passés, 60 p. 100, il n'y avait plus de *Sphaerotilus natans,* tandis qu'il y avait une grande quantité de *Anabaena spiroïdes* qui dominait. Ensuite il y avait beaucoup de *Coelosphaerium naegelianum,* puis *Microcystis flos-aquae,* et beaucoup plus faiblement représentés : *Melosira italica, M. varians, Navicula elegans, Pandorina morum, Synedra ulna, Oscillatoria* sp., accidentels : *Pediastrum duplex, Coelosphaerium kuetzingianum, Peridinium* sp., *Scenedesmus quadricauda, Eudorina elegans, Closterium* sp.

Le 29 août 1961, au barrage, les dominantes étaient *Ceratium hirundinella robustum,* et *C. hirundinella furcoïdes,* la première étant en excès sur la deuxième, puis

Asterionella formosa, en quantité plus faible : *Mallomonas fastigata, Staurastrum planctonicum, St. sebaldii.* Rares : *Coelosphaerium naegelianum, Gloeococcus schroeteri, Microcystis aeruginosa, Cymbella* sp., *Botryococcus braunii,* enfin *Anabaena* sp. était accidentelle.

Au pont des Biards, c'était *Mallomonas fastigata* var. *kriegeri* et *Asterionella formosa* qui dominaient, puis *Ceratium hirundinella robustum* venait ensuite, ainsi que *C. hirundinella furcoïdes* qui était moins bien représentée, assez fréquentes aussi : *Coelosphaerium naegelianum, Gloeococcus schroeteri, Staurastrum planctonicum* et *St. sebaldii,* rares : *Microcystis aeruginosa, Closterium* sp., *Pediastrum boryanum* et *Fragilaria crotonensis.*

Au pont de la République, il serait presque permis de parler d'une fleur d'eau à *Ceratium hirundinella,* la forme *robustum* domine largement, la forme *furcoïdes* est moins bien représentée, il y avait ensuite en quantité plus faible : *Asterionella formosa, Staurastrum planctonicum* et *St. sebaldii, Coelosphaerium naegelianum, Mallomonas fastigata, Gloeococcus schroeteri,* en plus faible quantité : *Botryococcus braunii, Microcystis flos-aquae, Pediastrum duplex, Melosira italica* et *Surirella* sp.

Au pont de Virey, la proportion du tripton était de 75 p. 100, il y avait ensuite une assez grande quantité de *Coelosphaerium naegelianum,* puis *Anabaena spiroïdes,* les autres espèces étaient rares à accidentelles : *Melosira varians, Pediastrum duplex* var. *clathratum, Oscillatoria limosa, Synedra ulna, Surirella robusta, Scenedesmus quadricauda, Synura uvella, Eudorina elegans, Melosira italica, Cosmarium bioculatum.*

Le 2 septembre 1961, une pêche de plancton a été faite au barrage seulement. Avec une grande quantité de zooplancton, il y avait beaucoup de *Ceratium hirundinella robustum,* puis *Microcystis aeruginosa* et *Eudorina elegans,* en quantité plus faible : *Coelosphaerium naegelianum, Asterionella formosa* et *Staurastrum. Microcystis flos-aquae* était peu abondant. En quantité plus faible : *Cymbella* sp., *Pediastrum duplex, Gloeococcus schroeteri, Botryococcus braunii* et accidentellement un kyste de *Ceratium hirundinella.* Il fut trouvé aussi un filament d'une cyanophycée qui ne put être déterminée avec certitude, (*Achronema*).

Le 26 septembre, au barrage, le plancton ne comprenait que peu d'espèces, les *Ceratium hirundinella* formaient presque une fleur d'eau, la forme *furcoïdes* est dominante, la forme *robustum* à 4 cornes est rare, il y a quelques individus dont la quatrième corne est rudimentaire. Nous trouvions ensuite en quantité beaucoup plus faible : *Coelosphaerium naegelianum, Gloeococcus schroeteri, Staurastrum planctonicum, Fragilaria crotonensis.* Rares : *Microcystis aeruginosa, Botryococcus braunii.*

Au pont des Biards, nous retrouvions la dominance de *Ceratium hirundinella furcoïdes,* avec quelques *C. hirundinella robustum* associés. Étaient présents : *Microcystis flos-aquae* et *M. aeruginosa, Coelosphaerium naegelianum, Gloeococcus schroeteri, Staurastrum planctonicum, Fragilaria crotonensis,* quelques cellules de *Cymbella,* et accidentellement un filament de *Spirogyra* sp. sans doute arrivé d'un ruisseau voisin.

Au pont de la République, existait toujours la dominance de *Ceratium hirundinella* avec presque uniquement des représentants de la forme *furcoïdes,* il y avait aussi des kystes de *C. hirundinella ; Microcystis aeruginosa, Coelosphaerium naegelianum* et *Anabaena spiroïdes* étaient abondants, moins bien représentés : *Microcystis flos-aquae, Melosira italica, Asterionella formosa, Staurastrum planctonicum, Gloeococcus schroeteri,* plus rares : *Fragilaria crotonensis, Botryococcus braunii, Melosira varians, Gomphonema constrictum, Tabellaria fenestrata, Cymbella* sp.

Au pont de Virey, le tripton représentait 60 p. 100, le phytoplancton était formé principalement par *Anabaena spiroïdes* et *Coelosphaerium naegelianum*, les espèces suivantes étaient rares : *Navicula p.* sp., *Microcystis flos-aquae, Synura uvella, Pediastrum duplex, Melosira italica, Synedra ulna, Melosira varians*, et accidentellement : *Kirchneriella lunaris, Asterionella formosa, Scenedesmus acuminatus, Mallomonas* sp., *Closterium* sp., *Anabaena* (*levanderi ?*).

Le 30 octobre au barrage, le zooplancton était important, le phytoplancton comprenait surtout : *Ceratium hirundinella furcoïdes* et *C. hirundinella robustum* en proportions sensiblement équivalentes, puis *Coelosphaerium naegelianum*, les espèces suivantes étaient peu fréquentes ou rares : *Microcystis flos-aquae, Staurastrum planctonicum, Closterium gracile, Dictyosphaerium ehrenbergianum, Gloeococcus schroeteri, Fragilaria crotonensis, Asterionella formosa, Mallomonas fastigata, Volvox* sp., et *Oscillatoria limosa* qui était accidentelle. La petite épiphyte sur *Coelosphaerium : Stylosphaeridium stipitatum* existait sur presque chaque colonie de son hôte.

Au pont des Biards, nous retrouvions *Ceratium hirundinella forme furcoïdes* et *Coelosphaerium naegelianum* comme espèces dominantes, puis *Mallomonas fastigata*, en moins grand nombre : *Staurastrum planctonicum, Closterium gracile* var. *elongatum, Microcystis flos-aquae*. De plus en plus rares : *Asterionella formosa, Volvox aureus, Synedra ulna, Fragilaria crotonensis, Botryococcus braunii, Melosira italica, Synedra acus, Anabaena spiroïdes, Rhizosolenia* sp., *Lyngbya hieronymusii, Attheya zachariasi, Cymbella* sp., *Gloeococcus schroeteri, Eudorina elegans*.

Au pont de la République, les espèces dominantes sont *Mallomonas fastigata* et *Ceratium hirundinella furcoïdes*, il y avait aussi quelques formes *robustum*. Cinq à sept fois moins abondantes : *Coelosphaerium naegelianum, Microcystis flos-aquae, Closterium gracile, Staurastrum planctonicum*, étaient seulement présentes : *Melosira italica, Synedra ulna, Fragilaria crotonensis, Gloeococcus schroeteri, Anabaena flos-aquae, A. spiroïdes, Navicula radiosa*, rares : *Surirella elegans, Eudorina elegans, Pediastrum duplex, Scenedesmus quadricauda, Pinnularia*.

Au pont de Virey, le tripton atteignait la proportion de 90 p. 100, puis il y avait une assez grande quantité de *Sphaerotilus natans*, les algues présentes étant : *Synedra ulna, Melosira varians, M. italica, Navicula* p. sp., *Surirella linearis, Coelosphaerium naegelianum*, il y avait aussi mais plus ou moins rares ou même accidentelles : *Oscillatoria limosa, Asterionella formosa, Eunotia pectinalis, Anabaena spiroïdes, Dinobryon divergens, Aphanizomenon flos-aquae*.

Le 27 novembre 1961, au barrage, en raison de la tempête le plancton a été ce jour prélevé du bord et non à partir d'une barque, pour ces deux raisons il contenait 60 p. 100 de tripton, mais aussi de nombreuses éphippies de cladocères. Les algues trouvées l'étaient toutes en petite quantité, mais aucune ne pouvait être dite accidentelle pour sa fréquence. *Gomphonema ventricosum, Cymbella, Synedra ulna, Navicula radiosa, Asterionella formosa* (cellules séparées). *Oscillatoria limosa, Fragilaria crotonensis, Coelosphaerium naegelianum, Melosira italica, Closterium gracile, Staurastrum planctonicum, Surirella robusta*.

Au pont des Biards, l'algue dominante était *Mallomonas fastigata*. Étaient encore bien représentées : *Melosira italica, Fragilaria crotonensis, Coelosphaerium naegelianum, Asterionella formosa*. Moins nombreuses : *Staurastrum planctonicum, Microcystis flos-aquae, Closterium gracile, Ceratium hirundinella, Gloeococcus schroeteri*,

Synedra ulna, rares et accidentelles : *Botryococcus braunii*, kyste de *Ceratium hirundinella*, *Surirella robusta*, *Lyngbya hieronymusii*, *Scenedesmus* sp.

Au pont de la République, une seule dominait largement les autres : *Mallomonas fastigata*. Étaient bien représentées : *Coelosphaerium naegelianum*, *Melosira italica*, *Fragilaria crotonensis*, étaient présentes : *Synedra ulna*, *Microcystis flos-aquae*, *Synura uvella*, *Navicula radiosa*, *Asterionella formosa*, *Ceratium hirundinella*, *Melosira varians*, *M. granulata*, *Gloeococcus schroeteri*, *Staurastrum planctonicum*, *Pediastrum duplex*, *Anabaena spiroïdes*, *Tabellaria fenestrata*, rares : *Eunotia pectinalis*, *Nitzschia* sp., *Cocconeis placentula*, *Cymbella* sp., *Tabellaria floculosa*.

Au pont de Virey, le tripton constituait 65 p. 100 de la récolte, *Sphaerotilus natans* était abondante, puis venait ensuite *Synura uvella*, les autres espèces étant plus ou moins rares : *Synedra ulna*, *Coelosphaerium naegelianum*, *Melosira varians*, *Navicula* p. sp., *Anabaena spiroïdes*, *Melosira italica*, *Surirella*, *Gomphonema acuminatum* var. *coronata* et *Oscillatoria limosa*.

Le 29 décembre 1961, le plancton total était très peu dense, au barrage, l'espèce dominante était *Fragilaria crotonensis*, puis *Melosira italica*. De plus en plus rares, puis accidentelles : *Synedra ulna*, *Melosira varians*, *Asterionella formosa*, *Microcystis flos-aquae* ; *Staurastrum planctonicum*, *Nitzschia* sp., *Anabaena spiroïdes*, *Pediastrum boryanum*, *P. duplex*, *Aphanocapsa*, *Closterium gracile*, *Oscillatoria limosa*, *Pinnularia viridis*, *Synura uvella*.

Au pont des Biards, le plancton aussi très clair renfermait 50 p. 100 de tripton, *Sphaerotilus natans* était présente en petite quantité, puis *Synedra ulna*, les autres espèces étaient peu représentées, ou rares : *Navicula radiosa*, *Melosira italica*, *M. varians*, *Surirella elegans*, *Nitzschia* sp., *Oscillatoria limosa*, *Eunotia pectinalis*, *Microcystis flos-aquae*, *Pinnularia gibba*, *Cocconeis placentula*, *Tabellaria floculosa*, *T. fenestrata*, *Gomphonema ventricosum*, *G. acuminatum*, *Nitzschia sigmoïdea*, *Eunotia robusta* var. *tetraodon*, *Gomphonema constrictum*, *Pediastrum duplex*, *Staurastrum planctonicum*.

Le 13 mars 1962 au barrage, le plancton trouvé était assez peu dense, *Asterionella formosa* dominait largement les autres espèces par son abondance, puis nous trouvions : : *Fragilaria crotonensis*, *Melosira italica*, *Peridinium palatinum*, *Synura uvella*. Beaucoup moins abondantes : *Mallomonas* sp., *Synedra ulna*, *Scenedesmus quadricauda*, *Dinobryon cylindricum*, *Surirella* sp., *Navicula radiosa*, *Eudorina elegans*, *Staurastrum planctonicum*. Rares et accidentelles : *Microcystis flos-aquae*, *Pediastrum duplex*, *Closterium* sp., *Gomphonema parvulum*, *Eunotia pectinalis*, *Pinnularia* (*microstoron ?*), *Oscillatoria limosa*, *Melosira granulata*, *Closteridium*.

Le 13 juin 1962, au barrage, nous trouvions trois espèces particulièrement abondantes : *Synedra ulna*, *Asterionella formosa*, et *Mallomonas* (*tonsurata ?*), cette dernière un peu moins bien représentée que les deux autres. Nous avions ensuite, en plus faible quantité : *Attheya zachariasi*, *Melosira granulata*, *M. italica*, *Fragilaria crotonensis*, *Kirchneriella obesa*, *K. lunaris*, *Anabaena spiroïdes*, *Pediastrum duplex* var. *reticulatum*, *Ankistrodesmus falcatus*, *Staurastrum planctonicum*, *Cosmarium* sp., *Dictyosphaerium pulchellum*. Les autres espèces étaient plus ou moins rares : *Volvox globator*, *Pediastrum tetras*, *Arthrodesmus triangularis*, *Scenedesmus* (*visconsinensis ?*), *Sc. quadricauda*, *Ceratium hirundinella*, *Dinobryon cylindricum*, *Peridinium palatinum*, *Microcystis*, *M. flos-aquae*, *Coelosphaerium naegelianum*, *Anabaena flos-aquae*,

Gloeococcus schroeteri, Coelastrum microporum, Botryococcus braunii, Pediastrum boryanum, Pandorina morum, Tabellaria floculosa.

Le 11 septembre 1962, on pouvait parler d'une fleur d'eau à *Fragilaria crotonensis,* à laquelle se trouvait mêlée une assez grande quantité de Cyanophycées : *Anabaena planctonica, Coelosphaerium naegelianum, Anabaena flos-aquae, A. spiroïdes,* ainsi que *Chlamydomonas* sp., *Scenedesmus quadricauda.*

Le 26 décembre 1962, tripton abondant, les algues étaient représentées principalement par *Fragilaria crotonensis,* qui était l'espèce dominante, puis *Synedra ulna, Melosira italica, Navicula radiosa, Tabellaria fenestrata, Gomphonema ventricosum, G. angustatum, G. constrictum, Cocconeis placentula, Gyrosigma attenuatum, Eunotia pectinalis, Pinnularia interrupta, Surirella* sp., *Rhoicosphenia curvata, Scenedesmus quadricauda, Ceratium hirundinella.*

L'étude de 1963 est faite par M. Feuillade ([58] 1965).

2. *Liste des espèces citées dans le phytoplancton de Vézins*

PROTOCARYOTES

BACTÉRIOSCHIZOPHYTES

SIDÉROBACTÉRIALES

O. Chlamydobacteriales

Sphaerotilus natans KÜTZ. (= *Leptothrix ochracea* KÜTZ.)

CYANOSCHIZOPHYTES

CYANOPHYTES

CYANOPHYCÉES

O. Chroococcales

CHROOCOCCUS NÄGELI

Chroocococcus minutus (KÜTZ.) NÄG. (*)
Chroococcus turgidus (KÜTZ.) NÄG. (**)

MERISMOPEDIA MEYEN

Merismopedïa tenuissima LEMN.
Merismopedia elegans A. BRAUN.

COELOSPHAERIUM NÄGELI

Coelosphaerium kuetzingianum NÄGELI
Coelosphaerium naegelianum UNGER

MICROCYSTIS KÜTZING

Microcystis aeruginosa KÜTZ.
Microcystis (*densa* G. S. WEST ?)
Microcystis flos-aquae (WITTR.) KIRCHN.

(*) Citées seulement par P. Frémy.
(**) Citées seulement par J. Hirt.

APHANOCAPSA NÄGELI

Aphanocapsa sp.

O. Hormogonales

SPIRULINA TURPIN

Spirulina sp.

OSCILLATORIA VAUCHER

Oscillatoria sp.
Oscillatoria curviceps AG. (*)
Oscillatoria formosa BORY
Oscillatoria limosa KÜTZ.
Oscillatoria tenuis AG. (*)

LYNGBYA AGARDH

Lyngbya sp.
Lyngbya hieronymussi LEMN.

ANABAENA BORY

Anabaena circinalis (KÜTZ.) HANSG.
Anabaena flos-aquae (LYNGB.) BRÉB.
Anabaena (*levanderi* LEMN. ?)
Anabaena planctonica BRUNNTH.
Anabaena spiroides KLEBAHN

APHANIZOMENON MORREN

Aphanizomenon flos-aquae (L.) RALFS

NODULARIA MERTENS

Nodularia spumigena MERT. (*)

TOLYPOTHRIX KÜTZING

Tolypothrix tenuis (KÜTZ.) SCHIND. (*)

O. Stigonemales

STIGONEMA AGARDH

Stigonema ocellatum THUR. (*)

EUCARYOTES

CHLOROPHYTES

CHLOROPHYCOPHYTES

ZYGOPHYCÉES

O. Zygnematales

SPIROGYRA LINK

Spirogyra sp.

O. Desmidiales

CLOSTERIUM NITZSCH

Closterium acutum BRÉB.
Closterium cornu EHREN.
Closterium (*cynthia* DE NOTARIS ?)
Closterium gracile var. *elongatum* WEST et WEST
Closterium leibleimanii KÜTZ
Closterium sp.

COSMARIUM CORDA

Cosmarium bioculatum BRÉB.
Cosmarium sp.

STAURASTRUM BRÉBISSON

Staurastrum paradoxum MEYEN (*) (**)
Staurastrum planctonicum var. *bullatum* TEILING
Staurastrum sebaldii var. *ornatum* f. *planctonica* (LUTKM.) TEILING
Staurastrum subcruciatum COOKE et WILLS.

ARTHRODESMUS EHRENBERG

Arthrodesmus triangularis LAGERH.

EUCHLOROPHYCÉES

O. Volvocales

CHLAMYDOMONAS EHRENBERG

Chlamydomonas sp.

PANDORINA BORY

Pandorina morum (MÜLLER) BORY

EUDORINA EHRENBERG

Eudorina elegans EHREN.

VOLVOX (LINNÉ) EHRENBERG

Volvox aureus EHREN.
Volvox globator EHREN.

O. Tétrasporales

GLOEOCOCCUS A. BRAUN

Gloeococcus schroeteri (CHODAT) LEMN. = *Sphaerocystis schroeteri* CHODAT

STYLOSPHAERIDIUM GEITLER et GIMESI

Styplosphaeridium stipitatum (BACHM.) GEITLER et GIMESI

O. Ulotrichales

MICROSPORA THURET

Microspora floccosa (MUCH) THUR. (*)

RICHTERIELLA LEMMERMANN (= *GOLENKINIA* CHODAT part.)

Richteriella botryoides SCHMIDLE (**)

PEDIASTRUM MEYEN

Pediastrum biradiatum MEYEN
Pediastrum boryanum (TURPIN) MENEGHINI
Pediastrum duplex MEYEN
Pediastrum duplex var. *reticulatum* LAGERHEIM
Pediastrum tetras (EHREN.) RALFS.

BOTRYOCOCCUS KÜTZING

Botryococcus braunii KÜTZ.

COELASTRUM NÄGELI

Coelastrum microporum NÄG.

WESTELLA DE WILDEMANN

Westella botryoïdes (W. WEST) de WILD. (*) = *Tetracoccus botryoïdes* W. WEST

NEPHROCYTIUM NÄGELI

Nephrocytium agardhianum NÄG.

ANKISTRODESMUS CORDA

Ankisdrotesmus falcatus (CORDA) RALFS

CLOSTERIDIUM REINSCH

Closteridium sp.

KIRCHNERIELLA SCHMIDLE

Kirchneriella lunaris (KIRCHN.) MOEBIUS
Kirchneriella obesa (W. WEST) SCHMIDLE

TETRAEDRON KÜTZING

Tetraedron caudatum (CORDA) HANSGIRG = *Polyedrium caudatum* CORDA (**)

SCENEDESMUS MEYEN

Scenedesmus acuminatus (LAGERH.) CHOD.
Scenedesmus dimorphus (TURP.) KÜTZ.
Scenedesmus quadricauda TURP.
Scenedesmus quadricauda var. *longispina* CHOD.
Scenedesmus spinosus CHOD.
Scenedesmus tetradesmiformis (WOLOSZ.) CHOD.
Scenedesmus (*wisconcinensis* CHOD. ?)

DICTYOSPHAERIUM NÄGELI

Dictyosphaerium ehrenbergianum NÄG.
Dictyosphaerium pulchellum WOOD.

CHROMOPHYTES

PYRROPHYCOPHYTES

CRYPTOPHYCÉES

CRYPTOMONAS EHRENBERG

Cryptomonas reflexa SKUJA

DINOPHYCÉES

PERIDINIUM EHRENBERG

Peridinium cinctum (O.F.M.) EHREN.
Peridinium palatinum LAUTERB.

CERATIUM SCHRANK

Ceratium hirundinella furcoïdes SHRÖDER
Ceratium hirundinella robustum (AMBERG) BACHMANN

CHRYSOPHYCOPHYTES

CHRYSOPHYCÉES

MALLOMONAS PERTY

Mallomonas fastigata var. *kriegeri* BOURRELLY = *M. caudata* in KRIEGER non IWANOFF
Mallomonas (*tonsurata* TEILING ?)
Mallomonas sp.

SYNURA EHRENBERG

Synura uvella EHREN. EMEND. KORSH.

DINOBRYON EHRENBERG

Dinobryon bavaricum IMHOF
Dinobryon cylindricum IMHOF
Dinobryon divergens IMHOF

BACILLARIOPHYCÉES

O. centrales

MELOSIRA AGARDH

Melosira distans (EHREN.) KÜTZ.
Melosira granulata var. *angustissima* MÜLL.
Melosira granulata var. *muzzanensis* MEISTER
Melosira italica (EHREN.) KÜTZ.
Melosira italica ssp. *subarctica* O. MÜLL.
Melosira varians C. A. AG.

CYCLOTELLA KÜTZING.

Cyclotella stelligera CL. et GRUN.

RHIZOSOLENIA EHRENBERG

Rhizosolenia longiseta ZACH. (= *R. gracilis* H. L. SMITH
= *R. longiseta* var. *Levanderi* A. CL.)

ATTHEYA T. WEST

Attheya zachariasi J. BRUN.

CHAETOCEROS EHRENBERG

Chaetoceros cochlea SCHUTT (**)

BIDDULPHIA GRAY

Biddulphia mobiliensis BAILEY (**)

O. Pennales

TABELLARIA EHRENBERG

Tabellaria fenestrata (LYNGB.) KÜTZ.
Tabellaria floculosa (ROTH) KÜTZ.

DIATOMA DE CANDOLLE

Diatoma sp.

FRAGILARIA LYNGBYE

Fragilaria crotonensis KITTON

SYNEDRA EHRENBERG

Synedra acus var. *angustissima* GRUN.
Synedra parasitica var. *subsconstricta* GRUN.
Synedra pulchella KÜTZ. (*)
Synedra ulna (NITZSCH.) EHREN.

ASTERIONELLA HASSALL

Asterionella formosa HASS.

EUNOTIA EHRENBERG

Eunotia (*lapponica* A. CLÈVE ?)
Eunotia pectinalis (KÜTZ.) RAB.
Eunotia pectinalis var. *ventralis* (EHREN.) HUSTEDT
Eunotia robusta var. tetraodon (EHREN.) RALFS.

RHOICOSPHENIA GRUNOW

Rhoicosphenia curvata (KUTZ.) GRUN.

COCCONEIS EHRENBERG

Cocconeis pediculus EHREN.
Cocconeis placentula EHREN.

NAVICULA BORY

Navicula elegans W. SMITH
Navicula gastrum EHREN.
Navicula hungarica GRUN.
Navicula placenta EHREN.

Navicula radiosa KÜTZ.
Navicula sp.

PINNULARIA EHRENBERG

Pinnularia acrosphaeria BRÉB.
Pinnularia appendiculata (AGARDH) CLÈVE
Pinnularia gentilis (DONKIN) CLÈVE
Pinnularia gibba EHREN.
Pinnularia interrupta W. SMITH
Pinnularia viridis (NITZSCH.) EHREN.

FRUSTULIA AGARDH

Frustulia rhomboïdes var. *amphipleuroïdes* GRUN.

GOMPHONEMA AGARDH

Gomphonema acuminatum var. *coronata* (EHREN.) W. SMITH
Gomphonema constrictum EHREN.
Gomphonema longiceps EHREN.
Gomphonema parvulum KÜTZ.
Gomphonema ventricosum GREGORY

CYMBELLA AGARDH

Cymbella sp.
Cymbella gastroïdes KÜTZ. var. *minor* H. V. (*)
Cymbella turgida (GREGORY) CLEVE

AMPHORA EHRENBERG

Amphora ovalis KÜTZ. (*)

NITZSCHIA HASSALL

Nitzschia recta HANTZSCH
Nitzschia sigmoïdea (EHREN.) W. SMITH

SURIRELLA TURPIN

Surirella capronii BRÉB.
Surirella elegans EHREN. (**)
Surirella linearis W. SMITH
Surirella robusta EHREN.

3. *Les espèces principales*

Nous passerons ici en revue les espèces que leur intérêt écologique, ou leur dominance, rendent particulièrement importantes dans le lac de Vézins.

Une bactérie, *Sphaerotilus natans* KUTZ., est trouvée fréquemment dans le plancton du lac, ainsi que dans la Sélune au pont de Virey. Elle est bien connue des hydrobiologistes, étant une caractéristique fréquente des eaux polluées par les matières organiques (A. G. WURTZ [184] 1957). Du point de vue systématique, les études les plus récentes, de PRINGSHEIM en particulier, ([145] 1949), démontrent que les Chlamydobactériales sont toutes, à des degrés divers, des Ferrobactéries capables de précipiter du fer, sous la forme hydroxyde ferrique, dans leur gaine,

et que, d'autre part, les espèces : *Cladothrix dichotoma* COHN. et *Leptothrix ochracea* KUTZ. ne sont, très probablement, que des modifications réversibles de *Sphaerotilus natans*. C'est cette terminologie que j'ai suivie. Les *Sphaerotilus* du plancton de Vézins présentent la forme dite de famine correspondant à l'ancienne espèce : *Cladothrix dichotoma* (A. G. WURTZ [184] 1957). Les filaments trouvés ne contiennent pas, en général, du fer dans leur gaine, leur origine est dans la pollution de la Sélune par la ville de Saint-Hilaire-du-Harcouët et les petites industries de produits agricoles situées sur la Sélune et sur l'Airon, son affluent. Je n'ai jamais trouvé de touffes de *Sphaerotilus*, de la forme typique de pollution chronique, flottant sur le lac. Le fait que cette bactérie soit identifiée à l'ancienne espèce *Leptothrix ochracea*, ferrobactérie typique, est intéressant à retenir pour la physico-chimie du lac ; je n'ai cependant, jamais trouvé de développement massif de la « forme » *Leptothrix* gainée d'hydroxyde ferrique.

Parmi les chlorophycées, *Gloeococcus schroeteri* est abondante en été au point 1, c'est une forme fréquente dans le plancton d'eaux diverses et qui n'apporte pas d'indications spéciales. En revanche, *Pandorina morum* et *Eudorina elegans* ne se développeraient que dans des eaux eutrophes. Le genre *Pediastrum* est fréquemment cité. La distinction entre les différentes espèces est assez délicate ; on rencontre souvent des formes présentant des caractères intermédiaires ou peu précis, et certains auteurs ont même prétendu que l'on avait souvent affaire à un nombre d'espèces réduit, prenant des aspects variables avec le milieu et avec l'âge. D'après les expériences de M. LEFÈVRE et P. BOURRELLY ([112] 1939), il semble, au contraire, que les diverses ornementations, pour *P. duplex* au moins, soient des caractères stables. Les *Scenedesmus*, représentés aussi par une liste d'espèces assez longue, ne sont toujours que peu abondants et sans intérêt écologique. *Dictyosphaerium pulchellum* est une algue dont l'apparition dans le plancton est sporadique, nous retrouvons là une conclusion de A. G. WURTZ pour le plancton du lac d'Eguzon. Les *Closterium* sont aussi représentés par plusieurs espèces. Ils n'atteignent une abondance, toute relative d'ailleurs, que dans la zone amont du lac, ce qui semblerait indiquer une préférence pour des eaux assez eutrophes mais, aussi un apport possible, vérifié pour certains au point 4, par les eaux de la Sélune. Les *Staurastrum* sont beaucoup plus importants ; en effet ils sont presque toujours présents dans le lac et constituent, en été, une des dominantes caractéristiques du plancton. En raison de très nombreuses espèces décrites, ils sont particulièrement difficiles à déterminer avec précision et certains auteurs, tel A. J. BROOK ([26] 1959), ont augmenté la confusion, pour l'algologue non spécialiste, en répartissant entre plusieurs espèces des *Staurastrum* déterminés précédemment comme *St. paradoxum*. Les deux *Staurastrum* les plus abondants à Vézins sont *St. sebaldii* var. *ornatum* f. *planctonica* (LUTKM.) TEILING et *St. planctonicum* var. *bullatum* TEILING ; M. P. BOURRELLY, sous-directeur au Muséum national d'Histoire naturelle a bien voulu donner lui-même cette détermination, je le prie de trouver ici l'expression de ma respectueuse gratitude. *St. planctonicum* est l'espèce la plus abondante, l'autre espèce n'est pas typique mais il apparaît difficile de la déterminer autrement.

Parmi les chrysophycées, *Mallomonas fastigata* var. *Kriegeri* est parfois très abondante, devenant alors une dominante du plancton. *Synura uvella* et les trois espèces citées de *Dinobryon* sont aussi assez souvent rencontrées dans le plancton de Vézins. Ce sont plutôt, dans leur ensemble, des formes d'eaux plus ou moins acides.

D'après certains auteurs, *Dinobryon divergens* ne demanderait qu'une faible teneur en sels nutritifs et serait une espèce apparaissant après le maximum des diatomées. D'après RODHE (rapporté par G. E. HUTCHINSON ([99] 1957), le phosphore serait même toxique pour cette espèce dès la concentration de 5 mg/m³ de phosphore sous la forme phosphate.

Les diatomées sont très importantes dans le lac et aussi dans le sédiment du fond puisque les varves étudiées par L. DANGEARD ([44] 1953) montrent, chaque année, une couche de carapaces de ces organismes. Les diatomées sont présentes toute l'année dans le plancton de Vézins, elles persistent même seules en hiver ; pendant cette saison, on trouve alors des espèces, de ce groupe, qui disparaissent en été.

L'espèce qui domine et qui est pratiquement toujours présente, aux points de plus grande profondeur du lac (1 et 2), est *Fragilaria crotonensis* KITTON. Sa permanence en pleine eau lui permet de produire une fleur d'eau lorsque les conditions deviennent particulièrement favorables pour elle. D'autre part, d'après CHU, *Fragilaria crotonensis* ainsi que *Asterionella formosa* seraient des organismes auto-auxotrophes, donc capables de produire eux-mêmes leurs propres hormones de croissance, d'où une nouvelle facilité pour la production de fleurs d'eau. D'après le même auteur, ces deux diatomées seraient particulièrement abondantes lorsque la productivité de l'eau est augmentée par l'action humaine, dans le bassin versant.

Asterionella formosa est aussi présente toute l'année ; d'après les travaux de K. A. GUSEVA, cette diatomée aurait de très grands besoins en fer. Contrairement à ce que l'on pense en général, ce ne serait pas la température ou l'éclairement qui agiraient directement sur la croissance de cet organisme, mais les substances minérales dissoutes, dont le fer en particulier. Effectivement, alors que l'optimum de température, pour la croissance de *Asterionella formosa* a été donné égal à 7°, le nombre maximal a été trouvé à Vézins en juin, alors que la température était supérieure de plusieurs degrés. On peut supposer que *A. formosa* joue un rôle dans l'enrichissement en fer du sédiment. On trouve souvent, des *Asterionella* de deux tailles différentes ; celles de petite taille présentent aussi le profil caractéristique des cellules de l'espèce *formosa*. Les *Melosira* sont presque toujours représentées dans le plancton ; *M. italica* montre des cellules de deux dimensions, nettement différentes. *M. varians* est une espèce benthique, trouvée souvent au point 4 et amenée aux autres points dans le plancton à partir des bords ou, plus probablement, par les petits affluents ; elle n'est jamais présente en grande quantité et disparaît en été.

Attheya et *Rhizosolenia* sont des formes ornementées franchement planctoniques. *Cyclotella stelligera* n'est trouvée que rarement dans le plancton de surface, mais elle est en revanche, abondante dans les débris de la vase du fond.

La chlorophycée : *Botryococcus braunii* voit l'intérêt se diriger souvent vers elle car elle contient, dans son cytoplasme, des gouttelettes d'une huile orangée, et elle joue un rôle très important dans la formation des sapropels et des schistes bitumineux (L. DANGEARD [44] 1953). Bien qu'elle puisse donner des fleurs d'eau dans des lacs de petite dimension, cela n'a jamais été le cas à Vézins où elle n'est même jamais abondante.

Le genre *Ceratium* est le plus important parmi les Dinophycées, il peut même produire des fleurs d'eau, dans les zones amont et moyenne du lac en particulier ; c'est le *C. hirundinella* (O.F.M.) SCHRANK qui est représenté par deux formes.

C. hirundinella furcoïdes SCHRÖDER donne la fleur d'eau de septembre ; c'est une forme élancée, de 250 à 300 microns de long et de 50 à 60 (51 microns étant le mode) de large ; elle possède trois cornes, les deux cornes post-équatoriale droite et antapicale sont, en général, convergentes. Cette forme se rencontre au printemps et a son maximum en automne, elle semble donc une forme d'eau froide.

C. hirundinella robustum (AMBERG) BACHMANN est plus abondante dans le plancton de juillet et, surtout, d'août et se présente donc comme une forme d'eau plus chaude. Elle est plus large et moins allongée, 216 à 240 microns de long seulement pour une largeur de 55 à 69 microns ; elle possède en plus, une quatrième corne, post-équatoriale gauche, tandis que les cornes antapicale et post-équatoriale droite sont plus divergentes que dans la première forme, le pourtour de la cellule est hérissé de petites aspérités, comme si l'armure cellulosique était plus épaisse.

Mais on observe aussi quelques cellules dont la quatrième corne est très rudimentaire ; je considère ces formes comme des intermédiaires des deux précédentes. En effet, d'après G. HUBER-PESTALOZZI ([92] 1950), elles passent de l'une à l'autre en fonction de la température. A la fin de l'automne, les *Ceratium* meurent ou passent l'hiver à l'état de kystes qui représentent une forme d'hibernation. A Vézins, de nombreux kystes sont trouvés dans le plancton de septembre en 1960 et 1961. Ceci doit donc indiquer que les conditions chimiques ne sont plus favorables pour *C. hirundinella* ; il reste d'ailleurs beaucoup moins de *Ceratium* dans le plancton récolté en octobre. Il apparaît donc que les conditions de milieu les plus favorables étaient réalisées en août 1961. A partir de novembre, on ne trouve pratiquement plus, dans le plancton de surface, que quelques rares individus isolés, sous forme végétative ou sous forme kyste, ce n'est qu'à partir d'avril ou de mai que leur nombre redevient appréciable. Le développement massif se situe de juillet à octobre, avec un maximum en septembre. On suppose en général, que les kystes reposent sur la vase, en hiver, et sont ramenés dans les couches supérieures lors de la circulation de printemps ; ceci ne peut être le cas de Vézins où l'établissement d'une stratification hivernale est exceptionnel, cependant, en février 1961, les kystes étaient présents dans le plancton du pont des Biards. Le gradient thermique existant alors pouvait permettre une circulation totale dans le lac, à cet endroit, sous l'action d'un vent même relativement faible.

En 1962 et 1963, au point 1, il n'y avait plus ou très peu de *Ceratium*, même en août et septembre. Ou bien il ne restait pas assez de formes hivernales dans la vase, ou bien les conditions favorables n'ont pas été reproduites. La rudesse exceptionnelle de l'hiver 1962-1963 n'a de toute évidence, pu que rendre plus totale une diminution qui, pour une cause non reconnue exactement, était déjà amorcée l'année précédente.

HUBER-PESTALOZZI distingue des formes nordiques et des formes tropicales qui convergent aux températures extrêmes ; aux températures les plus basses, comme aux températures les plus hautes, il y a apparition de formes à trois cornes. Par des cultures appropriées, à partir de kystes, cet auteur a montré que la première génération provenant de kystes correspondait d'emblée à la forme adaptée à la température de culture. qu'il n'y avait pas adaptation graduelle, comme on le supposait avant ses expériences. Il a conclu que la forme d'eau chaude présente plus de cornes, une divergence des cornes et un raccourcissement de la cellule, tandis que la forme d'eau froide présente moins de cornes, qui sont moins divergentes, et un allongement

de la cellule. Ce schéma correspond parfaitement au cas de Vézins. Signalons que les résultats de certains auteurs, rapportés par PESTALOZZI, ne sont pas toujours en accord avec les mêmes conclusions.

D'après le même auteur, *Ceratium* préfère des intensités lumineuses amoindries, même très faibles. *Furcoïdes* serait une forme sténotrophe, nécessitant une teneur élevée en calcium et une réaction alcaline, et ne se trouverait donc pas dans des eaux acides pauvres en calcium. *Robustum* serait une forme eurytrophe susceptible d'être rencontrée dans toutes sortes d'eaux. A Vézins, la teneur en calcium est toujours basse, mais le pH en surface est légèrement alcalin lorsque les *Ceratium* sont présents. Il semble bien que, lorsque la teneur en calcium atteint un minimum suffisant et que le pH est neutre ou légèrement alcalin, la température est le facteur qui conditionne la présence ou l'absence de la forme *robustum* dans le plancton, en diminuant le pourcentage des *furcoïdes* lorsqu'elle s'élève. Il n'est pas impossible, d'ailleurs,

TABLEAU 16

Variation annuelle, en 1961, des formes de Ceratium hirundinella *et relations avec la température en surface*

	A. *Au Barrage* :
Septembre 1960......	*Ceratium furcoïdes,* 3 cornes, L : 240 à 300 microns, l : 51 microns. Rares formes intermédiaires avec ébauche de 4ᵉ corne.
Octobre 1960........ t° = 12,55°	*C. h. furcoïdes,* et kystes de *Ceratium.*
Janvier 1961........ t° = 6°	Pas de *Ceratium.*
Février 1961........ t° = 9°	Pas de *Ceratium.*
Mars 1961.......... t° = 11,3°	Pas de *Ceratium.*
Avril 1961.......... t° = 14,60°	Peu d'individus de *C. h. furcoïdes,* forme élancée à 3 cornes.
Mai 1961........... t° 17,4°	*C. h.* forme intermédiaire, encore élancée, mais avec une 4ᵉ corne rudimentaire, simple bosse parfois, Des *C. h. furcoïdes* aussi.
Juin 1961........... t° = 20,5°	
Juillet 1961......... t° = 23,65°	*C. h. furcoïdes* est rare. Il y a des *C. h.* forme intermédiaire à 4ᵉ corne rudimentaire, *C. h. robustum* nombreux dominent, cornes divergentes. L. = 216 microns l = 51 à 65 microns.
Août 1961.......... t° = 18,45°	*C. h. robustum* domine, 4 cornes bien divergentes, Quelques *C. h. furcoïdes.*
Septembre 1961...... t° = 20°	Plancton le plus riche de l'année en *Ceratium. C. h. furcoïdes* élancés avec trois cornes non divergentes. Kystes. Individus intermédiaires avec 4ᵉ corne rudimentaire ou bosse.
Octobre 1961........ t° = 13,9°	Peu de *C. h. furcoïdes.* Beaucoup de *Cœlosphaerium.*
Novembre 1961...... t° = 8°	Pas de *Ceratium.*
Décembre 1961...... t° = 6,6°	Pas de *Ceratium.*

TABLEAU 16 (*suite*)

	B. *Au pont de Biards*
Janvier 1961........ t^o = 7,15°	Pas de *Ceratium.*
Février 1961........ t^o = 9,9°	Rares kystes de *Ceratium.*
Mars 1961.......... t^o = 11,5°	Quelques individus isolés de *C. h. furcoïdes* à cornes très divergentes
Avril 1961.......... t^o = 15,2°	*C. h. furcoïdes.*
Mai 1961............ t^o 18,7°	Zooplancton très abondant, peu de phytoplancton, pas de *Ceratium.*
Juin1961 .... t^o = 19,9°	*C. h. furcoïdes* en petit nombre.
Juillet 1961.......... t^o = 23,25°	*C. h. furcoïdes* très peu nombreux, forme intermédiaire à corne rudimentaire, ou avec seulement une bosse. *C. h. robustum.*
Août 1961........... t^o 19,4°	*C. h. robustum* à 4 cornes et peu élancés, cornes divergentes. L = 240 microns l = jusqu'à 65 microns.
Septembre 1961...... t^o 19,9°	Plancton le plus riche de l'année en *Ceratium.* Quelques formes intermédiaires. Kystes *C. h. furcoïdes* élancé. Très peu de formes *robustum.*
Octobre 1961........ t^o = 13,4°	*Ceratium* en nombre beaucoup plus réduit. *C. h. furcoïdes.* Quelques formes intermédiaires, à 4ᵉ corne réduite.
Novembre 1961...... t^o = 9,05°	Quelques individus isolés de *C. h. furcoïdes.*
Décembre 1961......	Pas de *Ceratium*

qu'en fait, la température agisse aussi indirectement par l'intermédiaire de l'activité modifiée d'un élément chimique, comme le fer par exemple.

On signale que, *Ceratium hirundinella* diminue et disparaît complètement du plancton, dès que les algues bleues apparaissent en grande quantité, cas des lacs fortement eutrophes et des petites pièces d'eau, avec *Microcystis*, *Aphanizomenon*, *Oscillatoria*, etc. On a incriminé les produits d'excrétion des algues bleues sans avoir encore donné de preuves formelles. Une forte eutrophisation ne semble pas, en tous cas, convenir aux *Ceratium hirundinella*. Cependant, j'ai trouvé, à Vézins, dans le plancton de septembre 1960, au pont des Biards en particulier, une fleur d'eau extrêmement dense donnant au lac un aspect de « soupe de pois », dont les *Ceratium* et les algues bleues, principalement *Microcystis*, formaient ensemble la dominance. Cela montre peut-être une eutrophisation en cours qui pourrait expliquer la diminution progressive des *Ceratium* dans le plancton du lac, très sensible à partir de 1962.

Les *Cyanophycées* sont souvent abondantes et donnent même lieu aux phénomènes des fleurs d'eau. *Coelosphaerium naegelianum* est souvent présente et est à son maximum en début d'automne. Les *Microcystis* posent un problème identique à celui créé par les *Ceratium* : *M. flos-aquae* a des colonies plus ou moins arrondies, tandis que le *M. aeruginosa* a des colonies de formes plus ou moins irrégulières ; en réseau en masse allongée, en formes de lettres, etc. En pratique la distinction est souvent très difficile et il est presque toujours possible, dans un plancton à *Microcystis* de trouver une certaine proportion des deux espèces, avec des formes peu typiques.

La distinction a aussi déjà été discutée par les spécialistes et certains, tel NAUMANN, n'ont pas hésité à prétendre qu'il n'y avait là qu'une unique espèce. Du point de vue écologique ; *M. flos-aquae* existerait seule dans les eaux oligotrophes, tandis que les deux espèces pourraient se rencontrer dans les eaux eutrophes, pour cette raison il est intéressant de conserver la distinction entre ces deux *Microcystis*. Il faut signaler que différents auteurs, dont principalement P. R. GORHAM ([78] 1960) en Amérique et M. S. KUN ([107] 1961) en Russie ont mis en évidence l'effet toxique de certaines fleurs d'eau à *Microcystis* sur les animaux.

Anabaena spiroïdes est plus souvent trouvée dans la zone amont du lac où elle approche même une fois le stade de fleur d'eau, elle serait d'après K. A. GUSEVA ([80] 1937) très exigente en matières organiques. *Aphanizomenon flos-aquae* moins exigente que la précédente indique aussi cependant un milieu eutrophe.

4. *Les variations du phytoplancton dans le lac*

Eh hiver, le plancton reste très pauvre, beaucoup de détritus constituent alors un tripton abondant. Pratiquement, les seuls éléments vivants sont des diatomées ; le nombre des espèces est grand mais il y a peu d'individus au total. Font exception à cette règle générale : *Fragilaria crotonensis* et, en moins grand nombre, *Melosira italica*. On remarque aussi, quelques *Staurastrum* isolés.

Au printemps, il y a toujours un grand nombre de diatomées : *Asterionella formosa* présente son plus grand développement à cette saison, sa courbe de croissance présente deux pics, l'un en mars et l'autre en mai-juin, supérieur au premier. Pendant la même période, on trouve aussi les deux maximums des *Melosira* et de *Synedra ulna*. Les Chrysophycées apparaissent : *Synura uvella*, *Dinobryon* et *Mallomonas* ; pour ce dernier genre le maximum sera trouvé en automne. Les Chlorophycées apparaissent aussi : *Eudorina elegans* montre une grande croissance en mars, à la fois au point 1 et au pont des Biards. Une Cryptophycée a aussi été trouvée à cette saison, mais en 1963 seulement : *Cryptomonas reffexa*.

En été, tous les groupes trouvés dans le lac sont alors représentés. Parmi les Diatomées, il y a un pic de la courbe de croissance d'*Asterionella formosa*, en août ; une fleur d'eau à *Fragilaria* crotonensis a été repérée en juillet-août 1963 au point 1. Les Melosira *italica* et *M. granulata* ont leur maximum au début de l'été. Parmi les Chlorophycées, il y a un pic de la courbe des *Staurastrum* en août 1963, au point 1. La Cyanophycée *Anabaena spiroïdes* est très abondante, en juillet, au pont de la République. Parmi les Dinophycées, *Ceratium hirundinella* trouve à cette même saison (en juillet) ses conditions les plus favorables et commence à se multiplier ; la forme d'été, *C. hirundinella robustum* présente sa croissance maximale en août.

En automne, il y a eu une fleur d'eau à *Ceratium hirundinella furcoïdes* en septembre 1961 et 1960 ; le plancton du lac n'a jamais été retrouvé aussi dense qu'à cette époque. On enregistre un développement très important de *Mallomonas fastigata* en octobre et novembre, au pont de la République ; ce développement a été retrouvé, en moins dense, en 1961 au pont des Biards, mais ne se retrouve pas au point 1. En septembre 1962, il y a eu, au point 1, une croissance très importante de *Fragilaria crotonensis*, dans laquelle *Anabaena planctonica* était aussi très abondante. Les Cyanophycées : *Microcystis* et *Coelosphaerium naegelianum* ont aussi leur développement maximal pendant la même saison. On remarque que les Cyanophycées dans

leur ensemble, sont plus abondantes en amont du lac qu'en aval, ceci traduit la plus grande eutrophisation à l'arrivée des eaux de la Sélune, polluées comme il a déjà été dit ; les variations identiques de la Bactérie *Sphaerotilus natans* sont absolument caractéristiques du même point de vue. Il y a eu un pic dans la courbe de croissance des *Staurastrum* en août 1963 ; on le retrouve en septembre mais moins élevé, bien que ce genre reste le mieux représenté ce mois-là (1 600 individus par ml en septembre pour 2 000 en août), il y a donc alors régression et il faut considérer que les conditions du milieu ne sont plus satisfaisantes pour ces algues.

On note aussi que de grandes variations sont possibles d'une année à l'autre. Pour avoir une image précise des variations annuelles, une étude portant sur 6 à 10 ans serait sans doute nécessaire et pourrait probablement permettre de rapporter les différences à des variations climatiques. Bien que le lac de Vézins soit maintenant assez âgé pour avoir atteint son équilibre biologique, il reste possible que l'évolution vers l'eutrophie se poursuive et qu'une étude de 10 ans puisse mettre ce phénomène en évidence.

D'une façon générale l'ensemble de l'étude sur le phytoplancton montre, en amont du lac, un plancton de type pollué par matières organiques ; une auto-épuration assez intense se manifeste ensuite et, aux points 2 et 1, nous trouvons un plancton de lac qui n'apparaît plus vraiment caractéristique d'une grande pollution, mais montre cependant encore un milieu très eutrophe. Étant donnée la localisation du bassin versant, situé uniquement sur des roches à dominance siliceuse et extrêmement pauvres en calcium disponible, cette eutrophie ne peut être causée que par la pollution relevée.

b) Le Zooplancton

Chaque récolte conduite pour l'étude du phytoplancton comprend aussi des organismes du zooplancton associés. Le type de filet dont j'ai pu disposer entraîne, malheureusement, une sous-estimation systématique du zooplancton bon nageur, les proportions sont de la même manière faussées au détriment des espèces ayant cette qualité ; il faut donc se contenter de dresser un catalogue des espèces rencontrées avec l'indication de leur époque d'apparition. De même, pour l'étude des variations verticales, une bouteille de prise d'eau d'une contenance minimale de 5 litres serait indispensable, et encore laisserait-elle aussi échapper une partie des meilleurs nageurs.

Entre le 15 novembre 1961 et le 21 décembre 1962, une étude a été poursuivie par J. Hirt ([88] 1962) dans le but principal d'étudier le microplancton, comprenant en premier lieu le groupe important des Rotifères et aussi des Ciliés ; les Cladocères ont aussi été traités de façon assez complète et seuls les Copépodes ont été laissés de côté. Ces animaux sont parmi les meilleurs nageurs du zooplancton d'eau douce et, actuellement, il n'existe pas de faune d'ensemble pour ce groupe en France, aussi ne peut-on, à moins de reprendre toute leur systématique, faire leur étude.

1. *Les espèces du zooplancton*

Parmi les Protozoaires, *Tintinnopsis lacustris* ENTZ. (= *Codonella lacustris* auct., = *C. cratera* (LEYDI) VORCE-KOFOID) est rencontrée très souvent, il en est de même pour *Epistylis rotans* SVEC. qui semble la seule espèce du genre *Epistylis* EHREN.

qui soit franchement planctonique, les autres étant fixées sur de petits animaux principalement. J'ai aussi rencontré, accidentellement, des Vorticelles dans le plancton du point 2, en décembre 1961 ; J. HIRT les signale en janvier 1962 au point 1 parmi les débris végétaux, elles ne sont jamais de véritables planctontes comme *Epistylis*. Même remarque pour *Carchesium polypinum* L. que j'ai aussi rencontré en avril 1961 au Barrage et au point 2 où il était relativement abondant ; il n'a pas été retrouvé par la suite. C'est aussi une espèce qui n'est pas planctonique en général et qui vit fixée sur des objets immergés dans des eaux plus ou moins sales ; la taille des cellules est beaucoup plus petite que celle des cellules de Vorticelles.

J'ai rencontré aussi, très fréquemment, des Thécamoebiens principalement en amont du lac mais aussi, plus rarement, au Barrage et au pont des Biards. C'est *Arcella vulgaris* EHREN., qui est le plus fréquent. J'ai aussi trouvé *Difflugia hydrostatica* ZACH., et *Euglypha* (*tuberculata* DUJ. ?). Accidentellement, au pont des Biards, en décembre 1961, je signale aussi un Héliozoaire : *Actinophris sol* EHREN. ; comme c'est-là le même plancton que celui qui contenait déjà les Vorticelles, il y a lieu de supposer un apport extérieur au lac, peut-être à partir de l'un des nombreux petits affluents.

Les Rotifères ont été très bien étudiés par J. HIRT et je n'ai pu trouver aucune espèce que cet auteur n'ait déjà signalée auparavant ; mes observations de 1961 sont en bon accord avec celles données pour 1962.

Pour les Cladocères, il en va presque de même ; cependant, je pense qu'il y a lieu d'ajouter à la liste : *Daphnia longispina mendotea* BIRGE, que l'on peut distinguer de *D. longispina galeata* SARS à ce que son cimier est plus arrondi et ne se termine pas par une petite pointe, il y a aussi une concavité du profil au-dessus du rostre qui est plus sensible que dans l'autre forme. J'ai aussi rencontré en plus : *Scapholeberis mucronata* var. *coronata* O. F. M¨LLER, *Pleuroxus striatus* SCHÖDLER et un *Alo*ne a sp. dont l'état ne m'a pas permis de déterminer l'espèce. Pour le genre *Bosmina* BAIRD, tous les auteurs semblent maintenant d'accord pour ne plus distinguer que deux espèces : *B. longirostris* O. F. MÜLLER et *B. coregoni* BAIRD, mais les anciennes espèces peuvent encore être réparties en plusieurs variétés et formes. C'est ainsi qu'en mars 1961, au pont des Biards, il y avait *B. coregoni longispina* LEYDIG, en avril de la même année c'est *B. coregoni obtusirostris* f. *lacustris* SARS, qui est trouvée aux points 1, 2 et 3. En mai 1961, c'est *B. longirostris* var. *pellucida* STING., qui est trouvée dans ma récolte au Barrage, tandis qu'au pont des Biards il y a à la fois cette variété et *B. longirostris* var. *longirostris* O. F. MÜLLER, qui se distinguent entre elles principalement par l'allure de leurs antennules. Au pont de la République, *B. longirostris* var. *pellucida* se retrouve seule. En juin, j'ai trouvé *B. longirostris* au pont de la République, *B. coregoni* au pont des Biards et les deux au Barrage, mais *B. longirostris* y est rare tandis que *B. coregoni* est abondante. En juillet 1961, il n'y a plus, dans tout le lac, que *B. coregoni coregoni* BAIRD en grande quantité. On peut considérer qu'il y a là le résultat d'une cyclomorphose, amenant cette forme à antennules plus longues et avec un début de gibbosité sur le dos. En août, on retrouve la même dans tout le lac, ainsi qu'en septembre. En octobre elle existe encore, mais au Barrage seulement ; on trouve associés un petit nombre de *B. coregoni obtusirotris* SARS. En novembre et décembre 1951, il n'y a plus dans mes récoltes que des *B. coregoni coregoni* BAIRD. En septembre 1962, nous retrouvons une grande abondance de Bosmines elles appartiennent dans leur ensemble à *B. coregoni coregoni*

BAIRD, mais avec quelques exemplaires qui pourraient être rapportés à *B. coregoni crassicornis* LILLJ. En décembre le zooplancton est nul, sans doute en raison de la température exceptionnellement basse qui règne alors. En 1963, nous n'aurons d'ailleurs, comme suite à un hiver particulièrement rigoureux, qu'un zooplancton beaucoup plus réduit que les années précédentes, ceci principalement à partir de juin et juillet où nous assistons, dans le phytoplancton, à une production massive de *Fragilaria* et de *Staurastrum* qui atteindra son développement maximal les mois suivants.

Les Copépodes sont à placer parmi les Diaptomidae, avec des représentants du genre *Diaptomus* WESTWOOD, et parmi les Cyclopidae SARS.

2. *Étude chronologique des récoltes*

Le 20 septembre 1960 au Barrage, nous trouvons *Bosmina coregoni*, *Epistylis rotans* et *Trichocerca birostris*. Au pont des Biards, *Keratella cochlearis* var. *macracantha* est rare, *Bosmina coregoni* et des *Nauplii* sont fréquents. Au pont de la République, il n'y a que quelques *Keratella cochlearis*.

Le 28 octobre 1960 au Barrage, le zooplancton est rare : *Keratella cochlearis* var. *macracantha* et *Brachionus angularis* var. *bidens*. Au pont des Biards nous avons *Difflugia hydrostatica* et des *Nauplii* et au pont de la République *Arcella vulgaris* et *Euglypha* (*tuberculata* ?).

Le 24 janvier 1961 au Barrage, *Keratella cochlearis* et *Tintinnopsis lacustris* sont encore rares ainsi que *Pleuroxus* du type *striatus* et des *Nauplii* au pont des Biards. Au pont de la République il n'y avait pas du tout de zooplancton.

Le 28 février 1961 au Barrage, il y a des Rotifères très nombreux qui dominent dans le plancton ; celui-ci ayant été formolé, de nombreuses espèces sont contractées et difficiles à déterminer, on trouve *Polyarthra euryptera*, *Keratella cochlearis* et, rares, *Tintinnopsis lacustris* et des *Nauplii*. Au pont des Biards nous retrouvons la même dominance des Rotifères : *Polyarthra euryptera*, *Keratella cochlearis* puis *Tintinnopsis lacustris* et *Bosmina coregoni longispina* qui est rare. Au pont de la République seules de rares *Arcella vulgaris* représentent la vie animale.

Le 20 avril 1961, il y avait au Barrage une très grande quantité de Rotifères *Polyarthra euryptera* et *Keratella cochlearis* var. *macracantha*, les *Bosmina coregoni obtusirostris forma lacustris* et *Epistylis rotans* sont aussi assez abondants, puis *Carchesium polypinum*, rares *Tintinnopsis lacustris* et des *Nauplii* ; il y a aussi quelques rares Copépodes adultes. Le 19, au pont des Biards le zooplancton était peu différent : *Keratella cochlearis*, *Polyarthra euryptera*, *Carchesium polypinum* étaient bien représentés, puis *Bosmina coregoni obtusirostris* f. *lacustris*, *Epistylis rotans*, *Tintinnopsis lacustris*. Au pont de la République, *Keratella cochlearis var. macracantha*, avec quelques exemplaires de la var. *tecta* et *Polyarthra euryptera*, dominent le zooplancton, puis *Bosmina coregoni obtusirostris* f. *lacustris*, *Trichocerca birostris* et *Tintinnopsis lacustris* ainsi que quelques *Nauplii*.

Le 18 mai 1961 au Barrage, de nombreux Rotifères sont contractés et indéterminables ; il y a *Polyarthra euryptera*, *Kelicottia* (= *Notholca*) *longispina*, *Keratella cochlearis*, *Bosmina longisrostris* var. *pellucida*, *Daphnia longispina*, *Epistylis rotans*, des *Nauplii* et quelques rares Copépodes adultes. Au pont des Biards ce sont les *Bosmina* qui dominent : *B. longirostris* var. *pellucida* et *B. longirostris* var. *longirostris*

puis *Keratella cochlearis, Polyarthra euryptera, Kellicottia longispina, Daphnia longispina, Epistylis rotans,* des *Nauplii,* quelques Copépodes et *Euchlanis dilatata.* Au pont de la République il y a beaucoup de *Bosmina longirostris* var. *pellucida,* puis *Arcella vulgaris* et *Keratella cochlearis, Alonella* sp. et, très rare, *Monostyla lunaris.*

Le 19 juin au Barrage, dominent *Polyarthra euryptera, Daphnia longispina, Bosmina coregoni,* tandis que *B. longirostris* est rare. Il y a aussi *Kellicottia longispina, Epistylis rotans, Keratella cochlearis, Tintinnopsis lacustris,* des *Nauplii* et des Copépodes adultes ainsi que quelques très rares *Arcella vulgaris.* Au pont des Biards, il y a surtout *Kellicottia longispina* puis *Tintinnopsis lacustris, Polyarthra euryptera ;* en moins grande quantité : *Epistylis rotans, Keratella cochlearis,* des *Nauplii* et, plus rares, *Bosmina coregoni, Alonella* sp., *Daphnia longispina* et des Copépodes. Au pont de la République, *Epistylis rotans* est surtout abondant puis on trouve *Keratella cochlearis* ; viennent ensuite *Tintinnopsis lacustris,* *Polyarthra euryptera, Kellicottia longispina,* puis des Copépodes, des *Nauplii, Bosmina longisrostris, Alonella* sp., *Daphnia longispina* ; très rare, *Scapholeberis mucronata* var. *cornuta.* Enfin, à cette époque de l'année, quelques rares animaux sont trouvés dans le plancton du pont de Virey : *Epistylis rotans, Tintinnopsis lacustris, Arcella vulgaris* et même *Keratella cochlearis.*

Le 24 juillet au Barrage, il y a une grande quantité de *Bosmina coregoni coregoni* et des *Keratella cochlearis* ; nous pouvons aussi trouver *Daphnia longispina,* des *Nauplii,* des Copépodes adultes et *Epistylis rotans.* Au pont des Biards, la liste est la même et il y a les mêmes proportions : *Bosmina coregoni coregoni* domine, puis *Kellicottia longispina, Keratella cochlearis,* des Copépodes et des *Nauplii, Epistylis rotans* et des *Daphnia longispina.* Au pont de la République : *Bosmina coregoni coregoni, Tintinnopsis lacustris* puis, rares, *Keratella cochlearis, Polyarthra euryptera. Kellicottia longispina,* des *Nauplii* et *Daphnia longispina,* enfin quelques *Arcella vulgaris.* Au Pont de Virey, quelques *Keratella cochlearis* et *Arcella vulgaris* seulement.

Le 29 août 1961 au Barrage, il y a la plus forte quantité de Copépodes que j'aie pu observer à Vézins, ainsi que de nombreux *Nauplii,* des *Keratella cochlearis* des *Bosmina coregoni coregoni,* des *Daphnia longispina ; Kellicottia longispina* est beaucoup plus rare. Au pont des Biards : *Bosmina coregoni coregoni, Keratella cochlearis,* des Copépodes, des *Nauplii, Kellicottia longispina* et *Daphnia longispina.* Au pont de la République il y a surtout des *Bosmina coregoni coregoni* et *Daphnia longispina* Au pont de Virey : *Arcella vulgaris, Brachionus urceolaris, Chidorus sphaericus* et *Keratella cochlearis.*

Le 26 septembre 1961 au Barrage, il y a encore beaucoup de Copépodes et de *Nauplii* ; les autres animaux sont devenus bien plus rares : *Keratella cochlearis Polyarthra euryptera, Kellicottia longispina, Daphnia longispina, D. cucullata.* Au pont des Biards, il n'y a plus que très peu d'animaux au total : quelques Copépodes, *Keratella cochlearis, Bosmina coregoni coregoni et Daphnia longispina.* De même au pont de la République : des *Nauplii, Bosmina coregoni, Keratella cochlearis* et *Kellicottia longispina.* Au pont de Virey il n'y a plus que quelques *Arcella vulgaris.*

Le 30 octobre 1961 au Barrage, il y a encore une certaine quantité de Copépodes, en particulier des *Diaptomus* dont de nombreux mâles sont parasités. Il y a aussi des *Nauplii, Bosmina coregoni coregoni* et *Bosmina coregoni obtusirostris, Daphnia longispina, Keratella cochlearis, Kellicottia longispina, Polyarthra euryptera, Diapha-*

nosoma brachiurum, Epistylis rotans, Trichocerca birostris, Monostyla lunaris et *Keratella quadrata.* Au pont des Biards, *Bosmina coregoni, Keratella cochlearis, Epistylis rotans*, des Copépodes et des *Nauplii* peu nombreux, *Polyarthra euryptera, Kellicottia longispina, Trichocerca birostris, Keratella quadrata* et *Daphnia longispina.* Au pont de la République il y a beaucoup de *Keratella cochlearis* et des *K. quadrata* avec *Kellicottia longispina* ; on trouve aussi *Daphnia longispina, Epistylis rotans,* des *Nauplii. Bosmina coregoni coregoni* et des Copépodes ; sont rares : *Thriarthra longiseta* et *Trichocerca birostris.* Au pont de Virey : *Keratella cochlearis* et *Arcella vulgaris.*

Ce 26 novembre 1961, en raison de la tempête, je n'ai pu prendre le plancton au Barrage qu'à partir du bord. Cette pêche contient de très nombreuses éphippies de Cladocères de deux tailles, mais il y aussi des *Bosmina coregoni*, des Copépodes, *Keratella cochlearis* et *Kellicottia longispina.* Au pont des Biards : *Bosmina coregoni coregoni, Kellicottia longispina*, des Copépodes, des *Nauplii, Keratella cochlearis, K. quadrata, Epistylis rotans, Tintinnopsis lacustris, Daphnia longispina* (des formes *galeata* et *mendotea*), *D. cucullata, Alona quadrangularis* et *Diaphanosoma brachiurum.* Au pont de la République, le zooplancton est encore très riche : *Keratella cochlearis, K. quadrata*, des Copépodes et des *Nauplii, Kellicottia longispina, Epistylis rotans, Alonella* sp.,*Polyarthra euryptera, Bosmina* sp. ; rares et abîmées : *Daphnia longispina, Tintinnopsis lacustris.* Au pont de Virey : *Arcella vulgaris* et *Trichocerca birostris.*

Le 29 décembre 1961 au Barrage, *Keratella cochlearis, K. quadrata,* des Copépodes et *Nauplii, Kellicottia longispina, Bosmina coregoni, Tintinnopsis lacustris, Polyarthra euryptera, Daphnia longispina* et *Brachionus angularis.* Au pont des Biards : *Keratella cochlearis* ; les autres très peu abondants : *Vorticella* sp., *Arcella vulgaris, Monostyla lunaris, Kellicottia longispina, Keratella quadrata,* quelques *Nauplii* et un *Actinophrys sol.* Au pont de la République, seulement quelques *Tintinnopsis lacustris, Arcella vulgaris, Polyarthra euryptera* et *Keratella cochlearis.*

Le 13 mars 1962 au Barrage, j'ai trouvé un zooplancton assez pauvre : *Tintinnopsis lacustris, Brachionus angularis* et *Keratella cochlearis.*

Le 13 juin 1962, le plancton est encore pauvre par comparaison avec celui du même mois de l'année précédente : *Kellicottia longispina, Epistylis rotans, Daphnia longispina, Keratella cochlearis.*

Le 11 septembre 1962, le plancton renferme : *Bosmina coregoni coregoni* et *B. coregoni crassicornis, Daphnia longispina*, des Copépodes, *Diaphanosoma brachiurum, Trichocerca birostris* et *Keratella cochlearis.*

Le 26 décembre 1962, le plancton est nul.

En 1963 les pêches n'ont été faites qu'au Barrage.

Le 12 mars 1963, on trouve un certain nombre de Rotifères qui sont contractés et indéterminables, *Keratella cochlearis* et des *Nauplii.*

Le 29 avril 1963, *Keratella cochlearis, Tintinnopsis lacustris, Bosmina longirostris, Polyarthra euryptera, Kellicottia longispina, Keratella valga, K. quadrata* et divers Rotifères encore indéterminables.

Le 29 mai 1963, *Kellicottia longispina, Polyarthra euryptera, Epistylis rotans,* divers Rotifères contractés, *Bosmina longirostris*, des Copépodes, *Keratella quadrata, Daphnia longispina, D. longispina* var. *mendotea* et *D. cucullata.*

Le 24 juin 1963, très peu de zooplancton : *Bosmina coregoni*, des *Diaptomus,*

Keratella cochlearis, Daphnia longispina var. *mendotea, D. cucullata, Polyarthra euryptera* et *Kellicottia longispina.*

A partir du 26 juillet, le zooplancton devient très réduit jusqu'à la fin de l'année. Seulement quelques *Keratella cochlearis* à cette date.

Le 22 août, quelques *Keratella cochlearis* et *Trichocerca birostris.*

Le 26 septembre, pas de zooplancton.

Le 30 octobre *Keratella cochlearis* et *Trichocerca birostris.*

Le 2 décembre (= plancton de novembre) : *Keratella cochlearis* des *Nauplii* et *Tintinnopsis lacustris.*

Le 30 décembre : *Keratella cochlearis.*

3. *Les variations saisonnières du zooplancton*

Pour rechercher ces variations j'ai tenu compte des résultats obtenus en 1962 par J. Hirt. Pour permettre les comparaisons, j'ai cherché, en premier lieu, à ramener les chiffres donnés par cet auteur, pour 150 000 litres, aux proportions utilisées habituellement par les limnologues dans leurs publications. En général, les quantités d'organismes sont pour un litre ou pour 100 ml, pour le zooplancton, et pour des volumes plus faibles, jusqu'au millilitre pour le phytoplancton. Ce travail met en évidence deux constatations : en premier que la méthode consistant à donner les résultats sur un grand volume d'eau permet de trouver l'existence et l'importance réelle d'organismes plus ou moins rares, mais elle risque de donner une apparence trompeuse car, en fait, les organismes du plancton, qui jouent un rôle dans la modification des conditions de leur milieu, doivent être présents en une quantité qui varie avec l'organisme considéré et que l'on peut estimer, au minimum, à plusieurs individus au millilitre. Ne sont donc intéressants, de ce point de vue, que les organismes rapportés à plus de 150 000 000 par J. Hirt ; seule une algue satisfait presque à ces conditions. Il apparaît, comme seconde constatation, par comparaison avec les valeurs généralement publiées et avec les valeurs trouvées par M. Feuillade ([58] 1964) dans le lac de Vézins, pour le phytoplancton et avec mes propres estimations, que la méthode suivie par J. Hirt entraîne une sous-estimation systématique très importante des organismes les plus abondants.

Le premier phénomène particulièrement important relevé est la diminution considérable du zooplancton en 1963. Ceci a d'ailleurs débuté dès décembre 1962, où le zooplancton trouvé était nul ; on ne peut accuser que les conditions atmosphériques exceptionnelles qui ont régné alors. Pour les autres variations, je ne peux, pour le même point de prélèvement, que confirmer les variations déjà rapportées. En automne, il y a grande abondance des Rotifères, des Cladocères et des Copépodes, bien que cependant j'aie trouvé moi-même la plus grande quantité de Copépodes en août 1961. De même, en 1961, j'avais observé les Bosmines et Daphnies beaucoup plus tôt dans l'année ; dès mai-juin, leur nombre était très important et le maximum des Bosmines avait été en juillet. La même année, *Polyarthra euryptera* était, aussi, apparu plus tôt et en plus grande quantité. Il est évident qu'une température moyenne plus élevée favorise beaucoup la multiplication de ces organismes.

En hiver, la production de zooplancton est toujours très faible ; seul le Rotifère *Keratella cochlearis* ne montre pas une multiplication affectée par cette saison, même en mars 1963. Dans la récolte effectuée trois jours seulement après le dégel

de la surface du lac, il se retrouvait avec des *Nauplii* de Copépodes, seuls zooplanctontes présents ; cependant, dans la suite de la même année, il est quand même resté moins abondant que les années précédentes.

Au printemps, il y a prédominance nette du phytoplancton sur le zooplancton mais, comme cela a déjà été signalé plus haut, certains éléments du zooplancton : Bosmines, Daphnies, Copépodes, certains Rotifères ainsi que les Ciliés peuvent connaître, les années favorables, un développement très important.

En été, l'augmentation normale de la température favorise certaines espèces du phytoplancton qui peuvent arriver au stade de fleur d'eau, et le phénomène précédemment cité au printemps est encore plus sensible. Quelques animaux comme les Copépodes peuvent alors trouver des conditions de nourriture, et peut-être d'oxygénation, qui leur permettent un grand développement, cas d'août-septembre 1961, mais en fin d'été beaucoup d'animaux ont, en général, totalement disparu pour ne réapparaître qu'au début de l'hiver.

Nous devons aussi tenir compte du fait que ces résultats sont basés uniquement sur des recherches de surface. Si nous avions la biomasse sous chaque unité de surface, nous pourrions voir que, dans certains cas, de prétendues disparitions ne sont, en fait, que des migrations en profondeur.

Les études aux autres points du lac, faites uniquement en 1961, montrent un zooplancton surtout printanier et estival, avec la persistance, en automne, des Bosmines et de *Keratella cochlearis* uniquement. D'autre part, le zooplancton devient un zooplancton d'étangs de moins en moins profonds ; la persistance de *Kellicottia longispina*, considéré plutôt comme une forme de grand lac, est la seule exception à cette remarque. Nous constatons une augmentation de l'importance de certains Protozoaires avec la diminution de la profondeur, il y a en particulier apparition des Thécamoebiens.

Keratella cochlearis est le zooplanctonte dont la présence est la plus constante dans le lac, quels que soient le lieu et l'époque de la récolte.

B. Le benthos

Le benthos du lac de Vézins apparaît pauvre en espèces. La vase varvée (déposée en-dessous de la cote 48, d'après A. JOURNAUX ([102] 1953) ne renferme jamais d'organismes vivants autres que des bactéries et des algues immobiles ou peu mobiles. Au-dessus, la vase encore épaisse, non varvée, renferme des oligochètes fouisseurs qui sont, de toute évidence, responsables de la disparition des varves, une observation expérimentale, rapportée d'autre part, ayant montré leurs possibilités de perturbation des couches de vase. Les exemplaires trouvés, de petite taille, sont des *Tubifex* sp. LAMARCK.

A un niveau plus élevé, jusqu'à la surface de l'eau, nous ne trouvons, dans la plus grande partie du lac, qu'un fond de blocs plus ou moins gros et de roches en place. Dans cette zone, il n'y a pratiquement plus de vase déposée, la faune est un peu plus riche et comprend des animaux très mobiles qui peuvent se déplacer verticalement avec les variations du niveau de l'eau. Depuis le Barrage jusqu'en amont du pont des Biards, la faune est très homogène à cette cote.

On y trouve : un Cladocère, *Sida cristallina* O. F. MÜLLER, pourvu d'un organe de fixation nucal, il est trouvé sur les pierres extraites avec précautions de l'eau. Un Isopode, *Asellus aquaticus* L., est aussi très fréquent. Des Hirudinées, *Herpobdella octoculata* L. et *Clepsine bioculata* (= *Helobdella stagnalis* L.). Nous avons ensuite des Mollusques de petite taille, *Ancylastrum fluviatile* MÜLLER et *Planorbis* (*Spiralina*) *spirorbis* L. Ces animaux sont en général des habitants des eaux pures souvent plus ou moins courantes. Le brassage continu des eaux du bord du lac sous l'action du vent crée les conditions qui leur sont favorables.

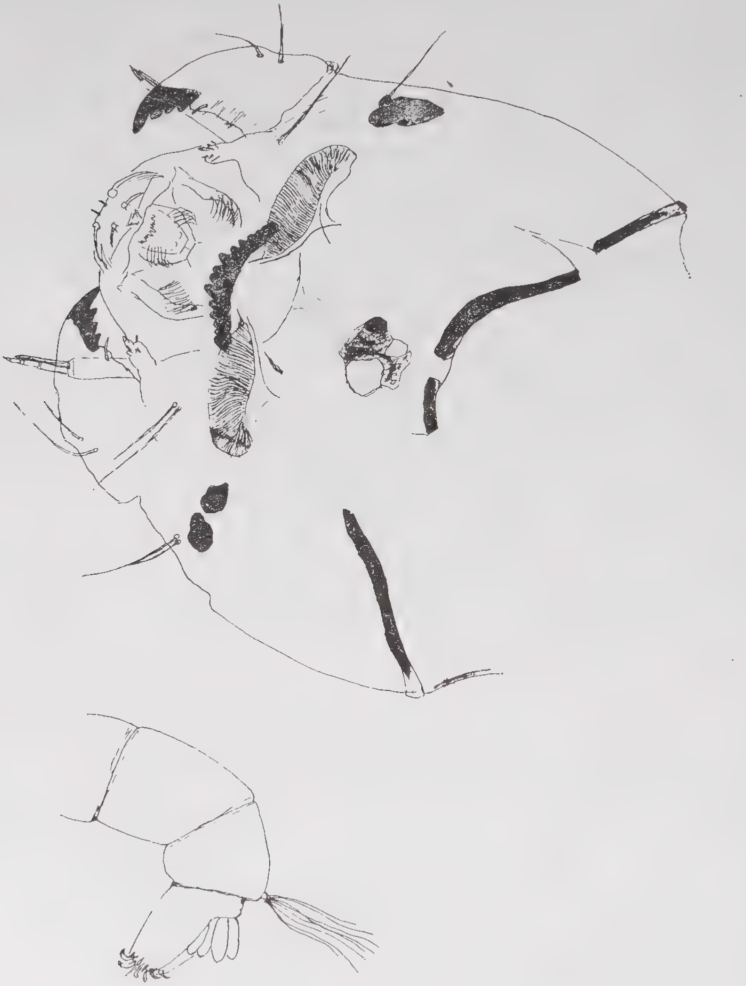

FIG. 5. — Limnochironomus *sp. caractérisque du lac de Vézins*

Parmi les Insectes, il y a un Éphéméroptère : *Siphlurella linneanus* ETN., représenté par sa larve-nymphe, et des larves de Chironomides nombreuses dont l'une est extrêmement abondante et peut être considérée comme caractéristique du lac : c'est un *Chironomus* S. G. *Limnochironomus* KIEFFER. En raison de la grande res-

semblance des larves des espèces voisines, il n'est pas possible de pousser, actuellement, la détermination plus loin.

Dans la figure 5, j'ai reproduit la préparation de la tête d'une de ces larves.

On trouve aussi, en plus faible quantité : *Limnochironomus falciformis* KIEF., *Endochironomus* sp. KIEF. *Gliptotendipes* sp. KIEF. (une larve du groupe *G. gripekoveni* trouvée dans des fragments végétaux supérieurs), *Corynoneura* sp. WINNERTZ, *Tanypus* sp. du groupe *T. monilis* L. Également, une larve d'Orthocladiinae non déterminée et une nymphe de Chironomien non déterminée.

Les petits affluents du lac déposent, à leur arrivée, des deltas, de sédiments plus ou moins sableux suivant la distance du point de dépôt. Sur ces deltas nous retrouvons : *Siphlurella linneanus* ETH. et des *Tanypus* du groupe *T. monilis* L. mais aussi des larves de *Tanypus* appartenant probablement au groupe de *T. costalis* KIEF. et des larves de *Polypedilum* sp. KIEF.

Si nous remontons un peu plus haut sur ces affluents, jusqu'à quelques mètres du lac proprement dit, la faune change en grande partie, seul *Ancylastrum fluviatile* MÜLLER est commun aux deux milieux. Nous trouvons des larves et des nymphes de *Simulium* LATREILLE et des tubes caractéristiques de *Rheotanytarsus* THIENEMANN. Les Éphéméroptères sont maintenant représentés par le genre *Baetis* LEACH ; nous trouvons aussi un Plécoptère, *Leuctra* STEPHENS, et des Trichoptères nombreux : *Hydropsyche* PICTET, *Halesus* STEPHENS et *Agapetus* CURTIS.

Il serait très intéressant de reprendre cette étude de façon approfondie ; cela supposerait la réunion d'un grand nombre de publications fragmentaires sur les groupes rencontrés et surtout l'élevage des larves jusqu'au stade imaginal, car beaucoup de larves de genres voisins sont semblables et très peu ont été décrites. Un tel élevage nécessiterait une installation spéciale à eau courante et devrait porter sur une période qui pourrait atteindre trois ans, ou plus en cas d'accidents.

C. Listes des espèces d'Invertébrés citées à Vézins

PROTOZOAIRES

THECAMOEBIENS

Arcella vulgaris EHRENB.
Difflugia hydrostatica ZÀCH.
Euglypha (*tuberculata?*) DUJ.

HELIOZOAIRES

Actinophrys sol EHRENB.

CILIÉS

Tintinnopsis lacustris ENTZ. (= *Codonella lacustris* auct.
= *C. cratera* (LEIDY) VORCE-KOFOID)
Epistylis sp. EHRENB.
E. rotans SVEC
Vorticella sp. L.
Carchesium polypinum L.

ROTIFÈRES

Asplanchna priodonta GOSSE
Gastropus stylifer IMHOF (**)
Synchaeta oblonga EHRENB. (**)
Polyarthra dolichoptera IDELSON (**)
P. euryptera WIERZEJSKI (= *P. trigla* var. *euryptera* WIERZEJSKI)
P. remata SKORIKOV (**)
Brachionus angularis var. *bidens* PLATE (**)
B. pala EHRENB. (= *B. calyciflorus* PALLAS) (**)
B. pala amphiceros EHRENB. (**)
B. urceolaris auct. ((= *B. urceus* L.)
Keratella quadrata MÜLLER (= *Anurea aculeata* EHRENB.
= *A. quadrata* auct.)
K. valga EHRENB. (= *A. aculeata* var. *valga* EHRENB.)
K. testudo EHRENB. (= *A. aculeata* var. *testudo*)
K. serrulata EHRENB. (= *A. serrulata* auct.)
K. serrulata EHRENB. (= *A. serrulata* AUCT.)
K. cochlearis GOSSE (= *A. cochlearis* GOSSE)
Notholca squamula (**)
Kellicottia longispina KELLICOTT (= *Notholca longispina* KELLICOTT)
Trichocerca birostris (= *Diurella stylata* EYFERTH)
T. porcellus GOSSE (= *D. porcellus* GOSSE)
T. cavia GOSSE (= *Coleopus cavia* GOSSE)
T. capucina WIERZEJSKI et ZACHARIAS (= *Rattulus capucinus* WIERZ. et ZACH.) (**)
Dinocharis tetractis EHRENB. (= *Trichotria tetractis* auct.) (**)
Euchlanis propatula GOSSE (= *Dipleuchlanis propatula* GOSSE) (**)
E. dilatata EHRENB.
Lecane luna O. F. MÜLLER (= *Cathypna luna* O. F. M.) (**)
L. mira MURRAY (**)
L. tenuiseta HARRING (**)
Monostyla lunaris EHRENB.
Lepadella ovalis EHRENB. (= *Metopidia ovalis* EHRENB.) (**)
Lophocharis salpina EHRENB. (= *Lepadella salpina* EHRENB.) (**)
Colurella bicuspidata EHRENB. (**)
Pterodinia patina O. F. MULLER (**)
P. mucronata GOSSE (**)
Pompholyx complanata GOSSE (**)
P. sulcata HUDSON (**)
Thriarthra longiseta EHRENB. (= *Filinia longiseta* EHRENB.)
Conochilus unicornis ROUSSELET (**)
Philodina sp. EHRENB. (**)
Rotifer sp. SCHRANK (**)

OLIGOCHÈTE

Tubifex sp. LAMARCK

(**) Signalés seulement par J. HIRT.

HIRUDINÉES

Herpobdella octoculata L.
Clepsine bioculata (= *Helobdella stagnalis* L.)

MOLLUSQUES

Ancylastrum fluviatile MÜLLER
Planorbis (*Spiralina*) *spirorbis* L.

CLADOCÈRES

Sida cristallina O. F. MÜLLER
Diaphanosoma brachyurum LIÉVEN
Daphnia pulex DE GEER (**)
D. longispina galeata SARS
D. longispina mendotea BIRGE
D. cucullata SARS
Ceriodaphnia pulchella SARS (**)
Scapholeberis mucronata var. *cornuta* O. F. MÜLLER
Bosmina longirostris O. F. MÜLLER
B. longirostris longirostris O. F. MÜLLER
B. longirostris pellucida STING
B. coregoni BAIRD
B. coregoni coregoni BAIRD
B. coregoni obtusirostris SARS
B. coregoni obtusirostris f. *lacustris* SARS
B. coregoni longispina LEYDIG
Alona quadrangularis O. F. MÜLLER
A. rectangula SARS (**)
Alonella sp.
Pleuroxus striatus SCHLÖDLER
Rynchotaloma rostrata KOCH (**)
Macrothrix laticornis JURINO (**)
Chydorus sphaericus O. F. MÜLLER
Polyphemus pediculus L. (**)
Leptodora kindtii FOCKE (**)

ISOPODE

Asellus aquaticus L.

ÉPHÉMÉROPTÈRES

Siphlurella linneanus ETN.
Baetis sp. LEACH

PLÉCOPTÈRE

Leuctra sp. STEPHENS

TRICHOPTÈRES

Hydropsyche sp. PICTET
Halesus sp. STEPHENS
Agapetus sp. CURTIS

DIPTÈRES

Simulium sp. LATREILLE
Limnochironomus sp. KIEFFER
L. falciformis KIEF.
Endochironomus sp. KIEF.
Gliptotendipes (gr. *G. gripekoveni* KIEF.)
Polypedilum sp. KIEF.
Corynoneura sp. WINNERTZ
Tanipus sp. (gr. *T. Monilis* L.)
T. sp. (gr. *T. costalis* KIEF.)
Rheothanytarsus sp. THIENEMANN

D. Les plantes supérieures

Dans les lacs de barrage où les variations de niveau sont d'amplitude plus ou moins grande mais sont toujours susceptibles d'être plus ou moins rapides, il n'y a pas, d'une façon générale, de plantes supérieures immergées.

Exceptionnellement, à Vézins, j'ai rencontré une telle plante ; celle-ci étant nouvelle pour la flore de la France, je l'ai signalée d'autre part (J. FEUILLADE [56] 1961 et [57] 1961). Ces deux notes contiennent une description détaillée des exemplaires trouvés sur place. Il s'agit d'*Elodea densa* (PLANCH.) CASP. ; originaire d'Amérique tropicale, elle est déjà acclimatée en trois points d'Allemagne. On peut la trouver en France chez les marchands de plantes aquatiques pour aquarium, il est très probable que son introduction s'est faite par ce biais. Son écologie connue indique une plante d'eau chaude et l'une de ses stations d'Allemagne est un canal d'écoulement d'une usine qui rejette des eaux réchauffées.

M. Capelle, garde-pêche qui surveille les deux lacs de la Sélune, m'a indiqué que cette plante envahissante, qu'il ne connaissait pas, existait dans le lac de « La Roche-qui-boit » depuis 1959 seulement ; il est probable que la première introduction ne doit pas être beaucoup plus ancienne. Les lacs ayant été vidés précédemment en 1952, il ne me semble pas possible, d'après mes dernières observations, que quelques touffes qui auraient existé avant aient pu survivre. Bien qu'envahissante et pouvant donc devenir gênante du fait de sa grande taille, cette introduction est bénéfique du point de vue de la production piscicole car elle apporte un abri, une réserve de nourriture très abondante et un support éventuel pour les œufs de poissons qui pondent dans les herbiers ; ces faits ont été relevés dans « La Roche qui-boit ». Dans le lac de Vézins, les *Elodea* trouvées étaient beaucoup moins denses ; en juin 1962 le niveau de l'eau a été baissé volontairement pour permettre des réparations à l'évacuateur de crues et a été maintenu à la cote 55 m environ pendant plusieurs mois, jusqu'en octobre. Ceci m'a permis de voir que, dans ce lac, les Élodées avaient colonisé toute la rive située sous l'*Auberge du Lac* à Vézins et qu'elles avaient poussé le plus densément à la cote 57 ; certaines touffes étaient enracinées encore à quelques décimètres sous la surface de l'eau au moment de l'observation mais elles étaient très rares. Au même moment j'ai pu aussi repérer quelques touffes éparses sur la rive sud du lac ; elles avaient pu prendre naissance à partir de frag-

ments de tiges issus de l'herbier principal. C'est la longueur de ces tiges, qui peut atteindre deux mètres, qui explique que la plante puisse supporter les variations de niveau courantes du lac de barrage ; mais les touffes qui se sont trouvées émergées pendant toute la durée de la baisse du niveau ont été détruites et je n'ai pas revu d'Élodées vivantes en 1963. Comme j'avais constaté, auparavant, une repousse de touffes temporairement à sec, sur le delta au fond du bras de Vézins, je dois admettre que l'hiver 1962-1963 a aussi contribué à la destruction de touffes de cette plante « d'eau chaude ». On peut cependant voir réapparaître la plante à partir des touffes qui étaient les plus profondes. En 1963, pour travaux au barrage de « La Roche-qui-boit », le lac du même nom a été vidé totalement à partir du début mai et maintenu à sec jusqu'en août ; j'ai pu constater que les bancs d'Élodées étaient bien établis sur des vases épaisses, mais là non plus je n'ai pas revu d'Élodées vivantes après la remise en eau. Il n'est pas impossible de la voir revenir dans les années suivantes à partir de fragments enracinés ayant persisté enfouis plus ou moins profondément dans la vase ; ce milieu conserve en effet très longtemps une certaine humidité qui aurait pu permettre cette survie.

Ceci nous montre que sous nos climats, disons au nord de la vallée de la Loire, il y a peu de chances pour que cette plante, assez exigeante du point de vue température, s'établisse dans toutes les rivières et y devienne une « peste » ; d'autre part, une mise à sec prolongée, lorsqu'elle est réalisable, peut très bien freiner considérablement son développement et le contrôler. On a pu constater que l'Élodée ne s'était établie que dans la zone la plus chaude du lac de Vézins et dans le lac inférieur. L'étude des températures a montré que la retenue n'entraînait pas le refroidissement de l'eau, mais qu'au contraire l'eau était plus chaude au point 0, situé sur « La Roche-qui-boit », qu'au point 4 tout en amont de Vézins. Il pourrait donc y avoir un intérêt à chercher à utiliser *E. densa* dans l'aménagement piscicole des lacs de retenue, les risques paraissant faibles.

E. Conclusion à l'étude biologique du lac de Vézins

Le plancton est variable, à un même moment, le long du lac ; ceci est en rapport avec deux types de faits qui agissent simultanément. En premier, la variation de la profondeur, qui donne un plancton d'étang en amont et un plancton de grand lac à proximité du barrage. En second, un apport d'eaux polluées par la Sélune ; le plancton traduit alors une auto-épuration certaine, le long du lac. Au point 1, la Diatomée *Fragilaria crotonensis* est l'espèce dominante que l'on trouve, pratiquement, toute l'année et qui est souvent si abondante que ses frustules dominent largement dans le sédiment déposé. Les autres espèces d'algues importantes sont : *Asterionella formosa*, *Staurastrum* représenté par deux espèces et *Ceratium hirundinella*. La dominance peut d'ailleurs varier beaucoup d'une année à l'autre, la température paraît être (directement ou indirectement) le facteur qui conditionne ce phénomène. *Botryococcus braunii* ne semble présenter qu'un intérêt théorique dans le lac.

Dans le zooplancton, quelques Rotifères et des Cladocères, *Keratella cochlearis* et *Bosmina* principalement, sont les composants fréquents et souvent abondants. Des Copépodes peuvent être, aussi, très abondants mais uniquement en année chaude.

Dans l'amont du lac, les Protozoaires deviennent les animaux les plus fréquents ils peuvent, d'ailleurs, être apportés directement de la rivière.

Le benthos est très peu riche, et en espèces et en masse, la vase renferme seulement quelques *Tubifex*, et uniquement lorsque l'eau qui la surmonte contient un minimum d'oxygène dissous. Près du rivage, l'animal le plus abondant est une larve de *Limnochironomus* sp.

Il existait une seule plante supérieure immergée, *Elodea densa* ; malgré une adaptation certaine aux variations de niveau de l'eau, elle a beaucoup souffert, et a même peut-être disparu, à la suite d'une baisse de niveau anormalement grande et de longue durée survenue en 1962.

La production du lac de Vézins ne présente donc une valeur élevée que pour le plancton.

QUATRIÈME PARTIE

LES SÉDIMENTS

A. Généralités

Nous trouvons, chez plusieurs auteurs dont RUTTNER ([152] 1952), principalement, les éléments d'une mise au point de cette question. Viennent s'y ajouter plusieurs publications récentes. Les dépôts lacustres sont en partie inorganiques et en partie organiques ; suivant leur origine, ils sont soit autochtones, ayant été formés dans le lac lui-même, soit allochtones, ayant une origine extérieure au lac. Les sédiments autochtones proviennent de la précipitation chimique ou de l'action des organismes et des restes des organismes aquatiques eux-mêmes. Les précipités chimiques les plus importants, susceptibles d'être rencontrés, sont ceux du carbonate de calcium et du fer.

Le fer peut être précipité sous forme d'hydroxyde ferrique mais peut être, aussi, amené aux sédiments par des organismes qui le concentrent autour d'eux ; c'est le cas de bactéries, principalement, mais aussi d'algues. Lorsque l'eau contient de l'hydrogène sulfuré, il y a précipitation de sulfate de fer quand la réaction devient alcaline.

De l'acide silicique est amené au sédiment par les carapaces des Diatomées mais aussi, souvent, par les plaquettes siliceuses des Chrysophycées et même, parfois, par des spicules de Spongilles. C'est surtout le sédiment le plus profond qui est le plus riche en silice.

Les composants les plus intéressants des sédiments sont les substances organiques. La matière humique arrive surtout dans les lacs à l'état colloïdal, en pseudo-solution provenant de la destruction des plantes des sols environnants. Ces colloïdes humiques floculent en arrivant dans l'eau des lacs riches en sels dissous, calcaire principalement ; il se forme alors un sédiment gélatineux caractéristique, appelé « *dy* » par les chercheurs scandinaves qui l'ont le plus étudié.

Les débris organiques du plancton et autres débris organiques d'origines diverses, auxquels s'ajoutent des débris minéraux en quantité variable, donnent, surtout dans la région centrale des lacs, un autre type de sédiment appelé « *gyttja* » par les mêmes auteurs.

Des intermédiaires par mélange, en diverses proportions, des composants vus ci-dessus se rencontrent naturellement et toute une classification a pu être établie. Nous verrons que la vase de Vézins se trouve être, suivant cette terminologie, une *gyttja* riche en débris de Diatomées et renfermant une assez forte proportion de

débris minéraux allochtones, dont la présence est due à la forme du lac où aucun point n'est vraiment très éloigné du rivage.

A titre d'indication, RUTTNER donne, pour 1954, le chiffre de 3 056 kg de poids sec de *gyttja* déposés par hectare dans le Lunzer Untersee, un lac oligotrophe normal, soit 784 kg de matière organique proprement dite par hectare.

Les débris organiques tombant sur le fond sont déjà attaqués pendant leur chute et les substances les plus aisément décomposables sont dégradées seulement pendant ce temps. Les recherches de H. R. KRAUSE et de ses collaborateurs ([106] 1961) ont mis en évidence certains composés formés pendant ce temps très bref, acides aminés et acides cétoniques principalement. Les substances attaquées difficilement, comme la chitine et la cellulose, arrivent inaltérées sur le fond du lac et ne sont détruites que très progressivement. Ce sont des bactéries qui sont les responsables principaux de ces décompositions qui se font, grâce aux enzymes qu'elles sécrètent ; il se produit des hydrolyses qui dégradent les composés organiques présents en corps de plus en plus simples. Les produits terminaux sont des composés minéraux, d'où la désignation par le terme « minéralisation » de l'ultime décomposition subie qui donne : du gaz carbonique, de l'eau, de l'ammoniac et de l'hydrogène sulfuré provenant de la portion soufrée des protéines. La décomposition de la cellulose donne des sucres, puis du méthane et du gaz carbonique. Les bactéries capables de provoquer la fermentation méthanique, à partir d'hexoses et même d'autres corps organiques de faible poids moléculaire, sont toutes strictement anaérobies et ne jouent leur rôle qu'à un pH alcalin.

Éventuellement, d'autres organismes, des protozoaires principalement et quelques invertébrés, vivant sur la vase ou dans ses couches tout à fait superficielles, participent aussi à la dégradation des matières organiques présentes. La lignine est attaquée surtout par des champignons aérobies.

En milieu très fortement anaérobie et réducteur, la décomposition n'aboutit pas à une minéralisation totale et il se forme un sapropel malodorant, coloré en noir par la présence du sulfure de fer. Ce sont des sédiments de cette sorte qui, aux époques géologiques, ont pu donner naissance aux sapropélites, aux schistes bitumineux et même aux pétroles.

Les sédiments stratifiés dans des lacs sont connus par plusieurs exemples. Pour que la stratification des sédiments, due à la variation annuelle des « précipitations », persiste, il faut que l'oxygène disparaisse de l'eau surmontant le sédiment, afin qu'une faune de fond d'organismes susceptibles de bouleverser les couches ne puisse s'établir mais aussi que la formation de sapropel soit peu avancée car, dans le cas inverse ce sont les bulles de méthane qui détruisent la disposition primitive. Un bon exemple est le lac de Zürich, dont les sédiments varvés ont été étudiés par NIPKOW (1920). Fait particulièrement remarquable, les sédiments de ce lac ne deviennent lités qu'à partir de 1895, date de la première apparition de fleurs d'eau à *Tabellaria fenestrata* ; depuis cette date, chaque varve a pu être attribuée à une année précise, les glissements de rivage étant bien marqués dans les varves par une augmentation importante de leur épaisseur. Ceci est en relation directe avec l'évolution de ce lac en voie d'eutrophisation, comme c'est le cas pour de nombreux autres. Dans des lacs dont les sédiments n'apparaissent pas directement stratifiés, une évolution a pu, cependant, être mise en évidence par l'analyse pollinique, comme elle est couramment pratiquée dans les tourbières.

A. Journaux a découvert et signalé, en 1953 [102], des varves dans les sédiments du lac de Vézins mis à sec ; l'étude des échantillons récoltés a été reprise ensuite par L. Dangeard [44] (1953).

Assez récemment, l'attention des limnologues s'est portée sur la recherche particulière des phénomènes concernant les échanges entre la vase et l'eau libre, au-dessus. Les deux publications principales sur ce sujet sont d'Alsterbey (1935) et d'Hutchinson (1941), mais le travail de Mortimer [129], (1941-1942) mérite aussi d'être considéré.

B. Étude descriptive

Comme il a déjà été signalé précédemment, les sédiments du lac de Vézins ont été observés et récoltés en place pour étude, au cours de la mise à sec de 1952.

A. Journaux a trouvé que les sédiments déposés en dessous de 12 mètres d'eau étaient varvés. Il a démontré que ces varves étaient annuelles et que leur épaisseur était en relation directe avec l'importance des pluies ; ceci est à rapprocher de l'observation, donnée dans la première partie, de l'importance des apports de particules en suspension dans les eaux des tributaires, aussitôt après chaque pluie. L. Dangeard [44] (1953), en étudiant au microscope, a reconnu pour chaque varve 4 ou 5 lits disposés dans l'ordre suivant :

a 2. lit à Diatomées 1. lit gris	zone claire	
b 4. lit noir 3. lit roux	zone foncée	une seule varve
a 2. lit à Diatomées 1. lit gris	zone claire	

et a décrit l'aspect microscopique des différents lits qu'il avait identifiés, ainsi que les variations rencontrées.

Le lit gris, d'aspect essentiellement argileux, est celui qui correspond à l'apport des suspensions des eaux affluentes et de ruissellement sur les rives. Il s'agit d'un remaniement des limons quaternaires.

En 1961 et les années suivantes, la retenue était sous eau. Je disposais d'un carottier à tube de plexiglass de 3 cm de diamètre extérieur, d'un modèle courant en limnologie. En raison de la fluidité des éléments et de leur faible épaisseur, je l'ai toujours vu arriver vide ou finissant de se vider, à la surface. La couche de terrain sous-jacente apparaissant composée principalement de blocs de roche, il n'est pas possible de découper, avec cet engin, un « bouchon » protecteur du prélèvement, le tube de plexiglass se brisant alors invariablement lors des essais.

Pour obtenir de la vase, j'ai dû me rabattre sur l'usage d'une benne d'Ekman, qui fonctionne correctement dans les conditions de Vézins en remontant un grand volume de sédiment sur les fonds favorables, mais, malheureusement, les couches sont perturbées lors du transfert dans un récipient pour le transport.

Il apparaît que la couche de vase, déposée aux abords du barrage depuis 1952, doit être de l'ordre d'une douzaine de centimètres seulement. Son épaisseur semble augmenter vers l'amont. Il faut se rappeler que, lors d'une mise à sec ou du gel de la

vase, ce sédiment perd sa structure organique de façon irréversible en diminuant considérablement d'épaisseur ; celles mesurées par A. JOURNAUX n'existent donc plus. Effectivement, vers le milieu du lac, au point 1, la benne remonte presque toujours à peu près vide, ayant coincé seulement, entre ses mâchoires, des fragments de bois ou de vase durcie en 1952 et ayant un aspect de roche tendre en plaquettes. Cette « ancienne » vase ne peut absolument pas être confondue avec celle déposée depuis la remise en eau.

A proximité du rivage (juste sous la cote 60 mètres), la couche de vase déposée sur les blocs est très mince, quelques millimètres au plus, comme il a été possible de le constater lors de la baisse de niveau de 1962. La benne ne remonte toujours que quelques fragments de roches lavés sur lesquels on ne trouve plus que de rares organismes capables de se fixer pour résister à l'entraînement.

Grâce à M. le Pr DANGEARD, il m'a été possible d'examiner, en premier, des échantillons provenant de la récolte de 1952. Ceux-ci se présentent, actuellement, comme des fragments de plaquettes de quelques centimètres, de teinte générale gris-blond avec des taches ocres. Sur la tranche des fragments, il est assez facile de retrouver les lits dans la superposition décrite, ce qui permet d'orienter les échantillons. Parfois, on trouve des empreintes de feuilles. Les éphippies de Cladocères sont bien visibles et aisément reconnaissables ; en raison de leur taille relativement grande, elles débordent souvent des lits noirs et on les trouve aussi mélangées aux autres lits. Il faut cependant remarquer que les lits roux sont souvent difficiles à délimiter. Il y a, par exemple, des zones rousses tachant la surface de lits brillants et où, manifestement, il ne faut voir qu'une infiltration secondaire de fer dans une couche de Diatomées bien marquée par son aspect morphologique. Aussi, dès le premier abord, on est amené à se demander si les lits roux sont les témoins d'une période de précipitation ou le résultat d'une diffusion de fer à travers les autres lits qui seraient, seuls, vraiment représentatifs d'une « saison » lacustre.

La préparation pour l'examen microscopique est très délicate car les carapaces des Diatomées, très fragiles, se brisent au grattage. La macération préalable dans divers liquides : eau, acides, eau de javel, bases fortes, ne donne que peu de résultats, suffisants cependant pour déterminer quelques espèces dont la dominante, formant au minimum 75 p. 100 du dépôt des lits à Diatomées les plus typiques et que l'on retrouve aussi dans les autres lits, est : *Fragilaria crotonensis* KITTON. Cette espèce est d'ailleurs largement représentée dans le plancton actuel. La vase fraîche permet plus aisément des déterminations mais sans pouvoir les rapporter à un niveau précis.

Dans l'examen microscopique des lits séparés, provenant de la vase récoltée en 1952, on constate qu'entre deux lits, qui seront désignés par la même appellation, il y a souvent des différences dans la composition. Il y a eu des variations d'une année à l'autre, seule l'obtention d'une carotte complète permettrait de voir s'il y a là une variation régulière depuis la formation du lac ou une variation irrégulière. Typiquement, la succession observée correspond au schéma de la figure 6 suivante.

Le lit noir a subi manifestement une rétraction latérale, soit lors de l'assèchement, soit lors de la compaction [1], d'où la formation des craquelures qui pénètrent parfois le lit supérieur. Ce lit noir est le plus nettement délimité, particulièrement vers

[1] Dans une communication orale, M. le Pr L. DANGEARD, m'a signalé qu'il avait réussi à mettre expérimentalement en évidence la formation de polygones de compaction dans la vase, sous l'eau.

le bas. L'observation fine montre un passage progressif du lit gris au lit à Diatomées, par enrichissement en ces carapaces qui finissent par exister à peu près seules au niveau supérieur. Lorsqu'on exerce un effort mécanique pour détacher les lits, ce lit à Diatomées représente le niveau le plus fragile et la cassure se produit alors, presque toujours, dans le plan le plus riche en carapaces. Les deux fragments enlevés, le supérieur et l'inférieur, montrent un plan de fracture tapissé du feutrage des carapaces.

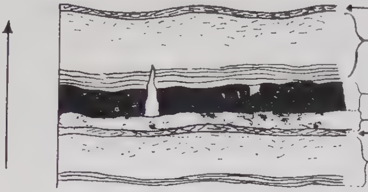

Fig. 6 : Schéma d'un fragment à varves complètes de la vase.
(récoltée en 1952 par A. Journaux)

A titre d'exemple, voici des compositions microscopiques relevées dans différents lits de la vase séchée.

Les lits à Diatomées typiques sont toujours très minces ; il a été trouvé, sur le produit de grattage de l'un d'eux :

Fragilaria crotonensis (— env. 90 p. 100)
Gomphonema acuminatum
Navicula radiosa
Cymbella ventricosa
Tabellaria floculosa
Cyclotella stelligera
Synedra ulna
Melosira distans

ainsi que 3 p. 100 environ de Desmidiées appartenant au genre *Staurastrum* et pratiquement pas de débris divers purement minéraux.

La composition des *lits gris* varie toujours, dans un même lit, avec le niveau. Juste sous un lit à Diatomées, il renferme encore beaucoup de celles-ci. Il y a environ 60 p. 100 de débris d'algues pour 40 p. 100 de débris divers.

Fragilaria crotonensis +++++
Cyclotella stelligera
Asterionella formosa
Melosira distans
Synedra ulna
et encore la Desmidiée *Staurastrum.*

A mesure que l'on s'éloigne de la couche brillante, il y a de moins en moins

d'algues et de plus en plus de débris organiques et de particules argileuses. Il y a environ 1 p. 100 d'algues seulement, dans la zone inférieure.

Fragilaria crotonensis ++
Asterionella formosa
Melosira distans
Staurastrum +.

Tout à fait à la base, il ne reste que de rares *Fragilaria* et, dans les petits lits noirs et gris alternant, seulement quelques débris de Diatomées, souvent indéterminables dans les produits de grattage.

Il semble qu'il y ait des variations d'une année à l'autre ; par exemple, il a été trouvé, au sommet d'un lit gris, juste sous la couche « à Diatomées » à *Fragilaria* :

Asterionella formosa +++++
Cyclotella stelligera ++
Gomphonema constrictum
Tabellaria floculosa
Melosira distans.

La formation de ce niveau a précédé exactement celui à *Fragilaria crotonensis* ; ces dernières sont apparues sans doute plus tard, l'année du dépôt de cette varve.

Dans le *lit noir typique*, à fragments de consistance cireuse, il n'est pas possible de faire de véritables observations microscopiques. Dans la partie supérieure de ce lit, où la loupe binoculaire montre des alternances très fines de gris et de noir, la préparation microscopique donne beaucoup de débris divers et quelques rares débris de Diatomées ; c'est la composition de la base du lit gris proprement dit qui se retrouve là.

L'examen microscopique des *lits roux* confirme la première idée en ne présentant jamais une composition algale qui puisse être considérée comme spéciale. Parfois, c'est le lit brillant à *Fragilaria*, typique, qui paraît coloré, d'autres fois, c'est la composition du lit gris qui se retrouve ; par exemple, au milieu d'une pâte de débris divers colorés en rouge, il a été trouvé environ 1 p. 100 d'algues, dont la liste est la suivante :

Fragilaria crotonensis +++++
Synedra ulna +
Melosira italica +
Melosira sp.
Nitzchia sp.
Navicula radiosa
Asterionella formosa
Gomphonema constrictum
Gomphonema sp.
Staurastrum.

La vase récente remontée à la benne ne permet plus de rapporter un organisme trouvé à un lit précis, mais peut être traitée par le mode classique de préparation des Diatomées, ce qui facilite beaucoup la détermination de ces algues. Un peu de vase est mise à séjourner plusieurs jours dans de l'eau de javel, celle-ci étant changée

à intervalles réguliers. Puis, la vase est lavée plusieurs fois à l'eau distillée, avec agitation et centrifugation ménagées successives. Une goutte est ensuite déposée sur une lamelle et calcinée, puis, on dépose quelques gouttes de xylol sur la lamelle pour chasser l'air et, enfin, une goutte de baume du Canada ; la lamelle est alors appliquée sur une lame pour l'observation. Dans le cas présent, la prise de vase de départ peut rappeler ensuite, au comptage, l'un ou l'autre des lits désignés précédemment (lit gris plus ou moins riche en algues ou lit brillant « à Diatomées »). La qualité de la préparation est mauvaise dès que les débris minéraux sont assez nombreux car elle conserve, alors, une trop grande épaisseur.

Dans un cas favorable, la liste suivante a pu être dressée pour une prise répartie en plusieurs lames :

Fragilaria crotonensis KITTON : 90 p. 100 des Diatomées
Synedra ulna (NITSCH) EHR.
Eunotia pectinalis var. *ventralis* (EHR.) HUST.
Melosira granulata (EHR.) KALFS. (var. *muzzanensis*)
Melosira italica (EHR.) KÜTZ.
Melosira varians C. A. AG.
Navicula radiosa KÜTZ.
Cocconeis placentula var. *Euglypta* (EHR.) CLÈVE
Cyclotella stelligera CL. U. GRUN.
Achnanthes lanceolata BRÉB.
Caloneis silicula (EHR.) CLÈVE
Synedra acus var. *angustissima* GRUNN.
Gomphonema ventricosum GREGARY
Gomphonema constrictum EHR.
Gomphonema acuminatum var. *coronata* (EHR.) W. SMITH
Pinnularia acrosphaerium BRÉB.
Pinnularia interrupta W. SMITH
Tabellaria fenestrata (LYNGB.) KÜTZ.
Cymbella ventricosa KÜTZ.
Surirella sp. TURPIN
Gyrosigma HASSALL

On note l'absence d'*Asterionella formosa*, abondante dans le plancton d'été, en 1961. Il semble que, comme il a été remarqué précédemment, cette espèce n'apparaisse en grandes quantités que certaines années ou bien n'a-t-elle pas supporté la préparation quoique les fragments des extrémités de ses frustules soient assez caractéristiques.

Dans une vase récoltée la même année, mais à un autre moment, diluée avec un peu d'eau formolée, puis agitée légèrement, on observe, après sédimentation libre en surface du dépôt :

Fragilaria crotonensis	très abondante
Synedra ulna	abondante
Asterionella formosa	abondante

et une grande partie des espèces citées ci-dessus.

Au fond du dépôt, on retrouve les mêmes espèces dominantes mélangées à des corpuscules à aspect de matière organique noire et, en plus, une assez grande quantité

de *Melosira italica* et *M. granulata,* et de nombreuses coques du protozoaire *Tintinnopsis lacustris.*

Sur la vase prélevée en avril 1963, et observée avec simple dilution dans un peu d'eau, il a été trouvé environ 50 p. 100 d'algues et 50 p. 100 de débris divers. Les espèces dominantes sont :

Fragilaria crotonensis +++++
Asterionella formosa
Synedra ulna
Melosira granulata var. *angustissima*
Melosira varians
Melosira italica
Staurastrum

puis la plupart des espèces déjà citées, trouvées en petite quantité ainsi que :

Pediastrum duplex
Microcystis
Surirella elegans
Carapaces de *Bosmines*
Éphippies (de *Daphnia ?*).

La prise observée devait correspondre à une couche assez superficielle, car de nombreuses algues possédaient encore leurs chloroplastes colorés, les *Fragilaria* en particulier ; les *Microcystis* avaient aussi conservé leurs pigments

Sur la vase prélevée au point 2, pont des Biards, la liste des algues présentes était en tout point comparable ; la proportion était de 25 p. 100 de débris planctoniques pour 75 p. 100 de débris minéraux divers.

Si, à ce stade, nous admettons comme hypothèse de travail que le lit roux ne représente bien qu'une diffusion secondaire du fer, nous arrivons alors à la succession de varves suivantes :

a 2. lit à Diatomées pures
1. lit gris
b 3. lit noir
a 2. lit à Diatomées pures
1. lit gris.

En fait, on trouve souvent, dans les échantillons que j'ai eus à ma disposition, une mince couche d'un lit qui peut être désigné par « lit gris » d'après sa composition, mais placée entre le lit à Diatomées pures et le lit noir ; c'est ce lit, souvent teinté de rouge par du fer, qui représente le lit roux trouvé dans les recherches antérieures (L. Dangeard [44] 1953), mais il est aussi, parfois, resté gris, donc n'a pas alors subi l'imprégnation ferrique postérieure. La succession typique redevient :

a 2. lit à Diatomées pures
1. lit gris
b 4. lit noir
3. petit lit gris souvent teinté de roux, inconstant
a 2. lit à Diatomées pures
1. lit gris.

Conclusions sur l'étude morphologique de la vase

Un lit composé (*a*), contenant des particules provenant du tripton et des restes du plancton, se dépose depuis, environ, début novembre jusqu'au début d'octobre de l'année suivante. Dans ce lit, la teneur en éléments d'origine triptonique est maximale lors des plus fortes précipitations, de novembre jusqu'en février, et diminue beaucoup ensuite, tandis qu'au contraire la quantité de débris planctoniques, Diatomées principalement, augmente fortement vers août-septembre. La teneur en tripton devient alors minimale (plus faible débit en 1961).

Ensuite, la proportion de tripton augmente souvent à nouveau, mais seulement pendant un temps très court. A la reprise de la circulation lacustre, en octobre-novembre, les constituants du futur lit noir précipitent assez brutalement et ensuite un nouveau lit gris se forme avec, au début, des alternances de minces lits noirs mélangés.

La formation des varves se résume donc, en définitive, suivant le schéma de la figure 7 suivante :

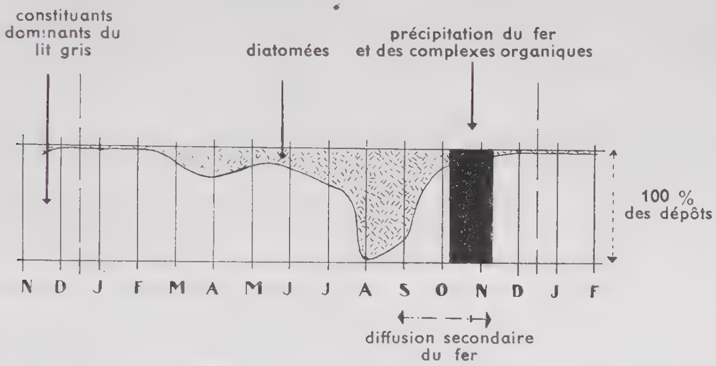

FIG. 7. — *Schéma de la formation des varves en année moyenne*

C. Étude physique de la vase

Disons, dès maintenant, que le sédiment, déposé sur la plus grande partie du fonc du lac de Vézins, est bien justiciable du nom de vase, ce qui sera confirmé par son étude et est en parfait accord avec son origine et son aspect.

a) *Granulométrie*

Elle a été étudiée par tamisage sous eau de la vase fraîche sur trois tamis ayant des mailles de 2 mm, 0,2 mm et 0,05 mm (norme A. F. N. O. R. NF × 11-501). Pratiquement, le tamis de 2 mm ne retient que quelques fragments de végétaux supérieurs facilement identifiables, feuilles ou morceaux de rameaux des espèces entourant le lac ou de mousse (fraction 1). Sur celui de 0,2 mm (fraction 2), on trouve surtout des débris animaux, carapaces de Bosmines dominant, ainsi que des éphippies, plus quelques débris végétaux et, sur de la vase fraîche récoltée le 29 avril 1963, quelques colonies de *Microcystis* encore bien vertes. Sur le tamis de 0,05 mm, la frac-

tion 3 est composée de grains minéraux (quartz, principalement) et de Diatomées. La fraction 4 est recueillie dans la cuvette sous le tamis précédent. Elle renferme encore des débris de Diatomées et des débris divers, minéraux ou organiques, non identifiables au microscope.

L'observation microscopique préalable de la vase fraîche montre surtout des plaquettes de *Fragilaria*, environ 50 p. 100 de l'ensemble des composants figurés. La granulométrie est probablement faussée par la destruction inévitable des plaquettes de *Fragilaria* et la brisure de nombreuses carapaces, ce qui doit tendre à augmenter la fraction 4. En raison de la forme de ces débris, une granulométrie par densimétrie de cette fraction < 0,05 mm serait faussée.

Valeurs moyennes trouvées :

Fraction 1		0,23 p. 100	> 2	mm
Fraction 2	2 mm >	0,72 —	> 0,2	—
Fraction 3	0,2 — >	9,99 —	> 0,05	—
Fraction 4	0,05 — >	89,06 —		
		100,00 p. 100		

b) *Teneur en eau*

C'est une notion particulièrement importante, aussi bien au point de vue de la connaissance physique du sédiment étudié que du point de vue de l'analyse chimique. Une fois cette valeur mesurée convenablement, il est souvent beaucoup plus pratique de partir, pour les analyses minérales, de sédiments séchés à l'étuve et de ramener les dosages au kilo sec. La teneur en eau est, de toute évidence, variable avec l'état physico-chimique et le mode de préparation de l'échantillon étudié.

J'ai procédé à la mesure sur l'échantillon naturel, ramené dans un bocal, après 24 heures de repos en étuve réfrigérée à 4 °C. (Le gel accidentel, détruisant de façon irréversible la structure, doit être absolument évité ; on voit alors, au dégel, le sédiment tomber au fond du récipient comme une poudre inerte et ne plus occuper qu'un volume inférieur à la moitié du volume primitif sous l'eau d'exudation.)

La partie supérieure de l'échantillon est décantée après 48 heures, et la mesure est faite sur une série de fractions de la vase restante placée dans des capsules de porcelaine, suivant la méthode classique exposée dans B. Brajnikov et *al.* [27] (1943).

Pour la vase de Vézins récoltée à proximité du point 1, prise comme sédiment type du lac, le calcul fait sur une série de prises de fond a donné les valeurs moyennes suivantes :

Th = 84,3 p. 100 (teneur en eau par rapport au poids humide)
et Ts = 568,4 p. 100 (teneur en eau par rapport au poids sec).

c) *pH et rH*

Les données existantes sur ces valeurs, mesurées dans la vase, sont, principalement, celles de C. G. Mortimer [129] (1941-1942).

Pour le pH, une assez large plage de valeur, de part et d'autre de la neutralité,

peut être trouvée. MORTIMER semble avoir mesuré le pH, plutôt afin de calculer le E_{H7} par la suite que pour l'étudier lui-même. La méthode colorimétrique ne peut s'appliquer directement. Il convient de diluer, en général volume à volume, une fraction de la vase avec une certaine quantité d'eau. La coloration communiquée à l'eau par la vase agitée est gênante pour l'observation de la couleur.

La mesure électrique avec les électrodes ordinaires doit souvent se faire sur la même préparation, ceci en raison de la fragilité extrême de l'électrode de verre courante. Il est évident que cette façon de procéder risque de modifier sensiblement le pH réel *in situ*. MORTIMER a utilisé une électrode à quinhydrone.

Pour Vézins, on peut considérer comme représentatif du pH de la vase en surface, les valeurs trouvées avec les électrodes immergeables posées sur le fond. Un pH moyen peut être trouvé en enfonçant les électrodes, avec précaution, dans la masse de la vase remontée à la benne. La fluidité de cette vase permet cette opération sans grand risque pour l'électrode de verre, à faible profondeur et, plus profondément, en utilisant les cannes sondes de pénétration, adaptables à l'appareil utilisé.

En mars 1962, nous avions 7,5 sur la surface de la vase, 7,1 en juin, 7,4 en septembre et 6,8 en décembre. En 1963, 7,7 en avril. Toutes ces valeurs s'éloignent peu de la neutralité ; souvent, elles sont légèrement plus alcalines que celles trouvées dans l'eau immédiatement au-dessus. Le pH mesuré dans la masse de la vase remontée à la benne, au point 1, en avril, était de 7.

Les données sur l'état d'oxydo-réduction sont, en grande partie, résumées par RUTTNER [152] (1953), surtout d'après MORTIMER. Il existe une stratification telle que le milieu devient plus réducteur avec la profondeur, ceci rapidement dans les six premiers centimètres. En dessous, une remontée des valeurs vers un niveau légèrement plus oxydant a été observée par MORTIMER dans un lac eutrophe et a rarement été rencontrée par RIVIÈRE [150] (1959).

RUTTNER note que de nombreux systèmes de substances oxydées et réduites de la vase ne sont pas directement réversibles, comme le demande la théorie explicative, mais le deviennent sous l'influence des êtres vivants rencontrés dans ce milieu. D'après cet auteur, nous devons être assurés que la même régularité existe dans ces systèmes biologiques aussi bien que dans les systèmes rédox purement chimiques. L'observation et l'expérimentation semblent confirmer pleinement ce point de vue.

Dans son étude, MORTIMER utilisait un montage ingénieux comprenant douze électrodes de platine brillant disposées simultanément à des profondeurs variables et permettant les mesures du potentiel d'oxydo-réduction moyen à un niveau choisi et de 2 mm d'épaisseur sans perturbation supplémentaire entre chaque mesure. Les mesures *in situ* étaient réalisées sur des carottes remontées au moyen d'un appareil spécial appelé « *Jenkin mud sampler* », réalisé dans un atelier de mécanique spécialisée du laboratoire même et remontant des échantillons avec le minimum d'altération ; cet appareil est un carottier comprenant un clapet inférieur arrivant latéralement.

Dans un lac oligotrophe, en surface de la vase et pendant la période de pleine circulation, une valeur du E_{H7} correspondant à $rH = 34$ est souvent trouvée et, ensuite, décline rapidement avec la profondeur. La valeur trouvée à 5 cm pourrait être considérée comme caractéristique du type de lac. L'intérêt est porté principalement sur le $E_{H7} = 0{,}20$ volt, qui est décisif pour l'état d'oxydation ou de réduction du fer ($rH = 20{,}7$). Pendant la stagnation, cette valeur peut être trouvée à la sur-

face de la vase et même des valeurs inférieures. L'apparition de H_2S dans l'eau ne peut se faire que si E_{H7} arrive entre 0,1 et 0 volt à la surface de la vase soit pour un rH égal ou inférieur à 17.

A Vézins, les valeurs trouvées, l'électrode immergeable posée sur la vase, sont les suivantes (elles sont, comme celles relevées dans l'eau, trouvées directement en rH):

rH = 25,9 en mars 1962, 24 en juin, 23,2 en septembre et 36,3 en décembre de la même année. Ces résultats sembleraient indiquer que les conditions n'ont pas été très réductrices à la surface de la vase en 1962.

En avril 1963, nous trouvons rH = 33, tandis que la mesure, faite sur place dans la masse de la vase remontée à la benne du même point, donne rH = 15,6. Une grande différence peut donc exister entre la mesure sur la surface de la vase en place et à quelques centimètres sous cette surface. En mai, le rH en surface est 32,6 et seulement 4,0 en juillet, puis 25,8 en août, 21,2 en septembre, 22,7 en octobre, 23,8 en novembre et 34,8 en décembre. Nous constatons une valeur très faible, en juin 1963, correspondant à l'établissement des conditions d'anaérobiose dans l'hypolimnion, à la suite de quoi le rH remonte vers les mêmes valeurs moyennes qu'en 1962, puis à 34,8 en décembre, valeur de l'eau bien oxygénée par la circulation. La période de rH très bas est courte et a donc très bien pu exister et passer inaperçue en 1962. La discussion de ces phénomènes est reprise d'autre part (4e part. chap. G).

d) *Capacité d'échange*

1° *Généralités.*

Dans une vase d'eau douce en place, une évolution permanente a lieu, évolution amenant des échanges avec l'eau recouvrante comme il a été dit plus haut. Les échanges dépendent de l'état physico-chimique de l'eau et découlent de deux types de phénomènes dans la vase. Premièrement, ils peuvent succéder directement à une réaction chimique donnée ; par exemple, il y a production d'un corps soluble qui diffuse dans l'eau d'imbibition puis, rapidement, dans l'eau de recouvrement. Inversement, un corps peut être fixé par une réaction et être prélevé dans l'eau. Deuxièmement, la vase, surtout par ses colloïdes, peut aussi fonctionner en adsorbant ou en échangeur d'ions.

Rappelons que les phénomènes d'échange d'ions ont été mis en évidence, pour la première fois, sur des argiles du sol (travaux de H. S. Thompson en 1850 et J. F. Wayen en 1850 également), les silico-aluminates étant alors les corps responsables du phénomène. Quelques argiles naturelles ont, par la suite, été utilisées en laboratoire pour réaliser des échanges d'ions mais, pratiquement, l'usage en est totalement abandonné au profit des échangeurs organiques synthétiques. Les phénomènes d'adsorption connus depuis plus longtemps sont à la base de la découverte de toutes les méthodes d'analyses par chromatographie, depuis les célèbres travaux du botaniste russe Tswett sur la chlorophylle.

Dans la vase, et dans les sols où les études ont été beaucoup plus poussées, il est très difficile de distinguer pratiquement ce qui dépend de l'adsorption pure et de l'échange d'ions pur. L'adsorption est une rétention de substances dissoutes ou de gaz, à la surface d'un corps. Pour un adsorbant donné, il y a une relation de constance entre la concentration de la substance dans la solution et la quantité retenue par adsorption. Dans l'échange d'ions, l'échangeur va capter certains ions dans la solu-

tion, par exemple Na^+, et libérer à la place une quantité équivalente de Ca^{++}. Un rapport entre la quantité d'ions fixés et la quantité en solution existe aussi, mais il y a, en plus, un ordre préférentiel pour la fixation des ions qui joue ; il a été mis en évidence dans l'étude des sols.

2° *Cas des sols, méthodes existantes.*

Pour l'étude, un passage d'eau distillée ne devrait extraire que les corps adsorbés, mais des phénomènes de dissolution jouent alors ; si nous faisons passer une solution saline pour réduire la dissolution, ce sont les phénomènes d'échange d'ions qui s'ajoutent.

Dans l'étude des sols, c'est principalement l'échange des cations qui a été considéré. Les substances échangeables étant celles immédiatement disponibles pour les plantes, les dosages de substances actives pour les études agronomiques sont faits, en général, sur des éluats, ce qui permet de distinguer, dans un sol, la quantité totale d'un corps présent et sa fraction échangeable ou « active » (voir P. DUCHAUFOUR [51] (1960). Pour les vases, il apparaît logique d'utiliser les mêmes méthodes et de partir des mêmes considérations. A. WURTZ a fait utiliser, depuis un certain temps déjà, quelques méthodes d'analyses courantes de la pédologie, pour des dosages sur des vases d'étangs et de rivières à la station du Paraclet. J'ai dû introduire des modifications pour l'application aux vases de Vézins, la méthode pédologique primitive se révélant inapplicable directement, dans la plupart des cas.

L'état du complexe adsorbant, dans les sols, est défini par deux valeurs : la capacité totale d'échange T et la somme des cations métalliques échangeables présents S. Le calcul permet de déduire un taux de saturation du complexe adsorbant (voir DUCHAUFOUR *op. cit.*). Les valeurs sont exprimées en équivalents et trouvées, en général, par percolation en colonne d'un poids donné de sol à l'aide d'une solution saline normale suffisamment tamponnée, acétate d'ammonium par exemple. La percolation étant progressive, la réaction d'échange est totale puisque les ions diffusant dans le liquide sont entraînés avec le courant de solution et celle-ci remplacée, au fur et à mesure, par de la solution de percolation pure. Lorsqu'on opère ainsi, la quantité d'ions ammonium retenue dans le sol donne la capacité totale d'échange tandis que les cations métalliques échangés se trouvent entraînés dans le percolat où ils sont dosables. Notons tout de suite que, suivant la technique employée, les résultats sont différents pour un même sol ; les valeurs les plus élevées, et probablement les meilleures, sont obtenues en percolant avec de l'acide chlorhydrique N/20.

Les pédologues ont mis en évidence que les divers éléments adsorbants du sol ne présentaient pas la même capacité d'échange ; les composés humiques ont un pouvoir adsorbant 4 à 5 fois plus élevé que les argiles et, parmi celles-ci, certaines sont encore bien plus actives que d'autres.

3° *Cas de la vase.*

Pour les vases, il ne m'a pas été possible de trouver, dans la littérature, un travail où elles aient été considérées et traitées du même point de vue que les sols. Bien que les différentes méthodes puissent être utilisées, celle avec l'acide chlorhydrique semble la plus intéressante.

Techniques employées pour la vase de Vézins. — En premier, la percolation sur

colonne a été essayée. Le montage comprend une colonne à chromatographie, en pyrex, terminée, à la base, par une plaque de verre fritté ; à la partie supérieure de la colonne est adapté un bouchon percé et une poire de caoutchouc permet d'exercer une pression sur le liquide de percolation. On constate, en premier, que le passage à travers une colonne de 13,5 mm de diamètre intérieur et de 150 mm de long (volume occupé par la vase) se fait à une vitesse à peine supérieure à une goutte par heure ce qui rend la méthode pratiquement inapplicable. En utilisant une colonne de plus grand diamètre, 30 mm de diamètre intérieur, et en y plaçant le même volume de vase, la hauteur de la colonne tombe à 32 mm et, dans ce cas, la percolation est plus rapide ; l'échange sera alors terminé en trois jours.

On constate que, au fur et à mesure de l'avancement de l'échange, une zone grise, très claire, se développe à partir du haut de la colonne. Elle est toujours limitée, vers le bas, par une ligne nette la séparant de la vase foncée non modifiée. Cette ligne de séparation se déforme plus ou moins en progressant et, malgré les précautions prises au remplissage, tout se passe comme si l'échantillon de vase n'était pas parfaitement homogène. Ceci est, évidemment, plus sensible avec la colonne de plus grand diamètre. En fin de percolation, certains points du front de la zone échangée atteignent le verre fritté, alors qu'il reste à côté des zones non modifiées. Ceci rend l'observation de la fin de l'échange par la modification du pH de l'effluent, assez peu précise et oblige à procéder à une titration. De plus, la durée de l'essai rend difficilement évitables des pertes par évaporation dans le percolat. On constate, d'autre part, que dès qu'une portion de front de la zone claire a atteint le verre fritté, la percolation devient plus rapide, indice confirmant la perte de structure primitive de la vase.

Les cations entraînés sont, toujours dans le cas présent particulier de la vase de Vézins, représentés principalement par du fer. C'est d'ailleurs très probablement l'enlèvement de ce fer des complexes où il était retenu, qui provoque la perte de structure enregistrée. Cette première percolation entraîne les cations et leur remplacement par des ions H^+. Si nous effectuons une deuxième percolation, avec de l'acétate de baryum normal par exemple (méthode Chandler pour les sols, (Duchaufour [51] 1960)), nous devons déplacer, en principe, la totalité des ions H^+ alors fixés et en déduire la capacité totale d'échange. Il est évident que le résultat sera d'autant plus précis et représentera mieux la capacité totale réelle d'échange, que la structure de la vase aura été moins détruite au premier temps. Or, dans le cas présent, cette structure reposant principalement sur les complexes ferrugineux semble très altérée de façon irréversible. D'autre part, le premier percolat entraîne, manifestement, des cations organiques et des produits qui se sont dissous. Les erreurs ainsi enregistrées ici sont beaucoup plus faibles dans le cas de nombreux sols où la capacité d'échange provient surtout des argiles contenues qui, dans les conditions de l'expérience, ne perdent pas leur structure ni ne se solubilisent. Une autre cause d'erreur, négligeable à Vézins, provient de la teneur en carbonate de calcium et en sulfures attaqués par ClH étendu ; il est évident que les carbonates attaqués dans le premier temps libèrent des ions Ca^{++} dans le percolat contre des ions H^+ prélevés. Ce calcium est dosé dans la somme des cations échangeables, mais l'hydrogène correspondant ne peut être retrouvé dans la deuxième percolation. Il convient donc d'en tenir compte en dosant séparément le carbonate de calcium et les sulfures éventuels. A Vézins, une partie du fer présent ramené à l'état libre par action bactérienne joue un rôle comparable.

Il ressort, de différents essais de percolation sur colonne de la vase étudiée, que les résultats sont assez variables d'une percolation à l'autre. Les sels de fer, par leur abondance, sont les principaux responsables des mauvais résultats de la méthode.

J'ai donc été amené à rechercher une méthode plus rapide et plus simple dans son exécution. Il est possible de faire, au laboratoire, un échange contre une résine non pas sur colonne mais en agitant la solution et la résine. Si la quantité de solution est grande par rapport à celle de la résine, le partage des ions existants sur la résine sera tel que la presque totalité d'entre eux passera dans la solution (en colonne, la solution arrivant toujours neuve échangera la totalité des ions échangeables) ; avec le premier procédé, il est possible d'arriver cependant à une perte négligeable. En procédant ainsi avec la vase, il serait possible de gagner un temps appréciable si la nécessité de filtrer ensuite ne nous ramenait pas, pratiquement, aux ennuis de la méthode par percolation sur colonne. Mais il est aussi possible de titrer une résine afin de connaître ses possibilités d'échange. Avec la vase, l'usage d'un indicateur coloré est impossible en raison de la coloration propre du milieu et j'ai été amené à utiliser la méthode suivante :

20 g de vase fraîche sont placés dans un bécher avec 75 ml d'eau distillée ; le tout est mélangé par agitation magnétique, celle-ci étant ensuite maintenue pendant toute la durée des mesures, puis le pH du mélange est mesuré électriquement. Ensuite, une solution titrée d'acide chlorhydrique N/20 est versée à la burette, millilitre par millilitre et le pH est mesuré après chaque addition d'acide jusqu'à arriver à un palier inférieur. L'emploi d'un appareil à titration automatique peut certainement faire encore gagner beaucoup de temps dans cette mesure.

Puis il est procédé à une deuxième titration, qui est un véritable dosage à blanc sur 75 ml d'eau distillée ; il est nécessaire d'utiliser l'eau provenant de la même bouteille pour tenir compte des gaz éventuellement dissous.

Les résultats des deux séries de mesure sont portés sur le même graphique : la courbe avec l'eau seule donne la variation du pH par simple dilution, la courbe avec la vase donne, par différence, la quantité d'acide ayant été échangée contre les cations présents (et ayant éventuellement réagi avec CO_3Ca dont il faut tenir compte) puis se termine aussi par une simple courbe de dilution. La difficulté réside dans l'appréciation du pH en dessous duquel la courbe devient cette simple courbe de dilution. La complexité du mélange « vase » étudié ne permet d'opérer que par comparaison avec la courbe réalisée sur l'eau pure, aussi une certaine imprécision existe et il convient de considérer la méthode comme un test de valeur indicative certaine et non comme un dosage de valeur absolue. La capacité d'échange trouvée est très voisine de la capacité d'échange réelle et correspond à la somme des cations existants échangeables.

Pour Vézins, voir figure 8. Dans l'exemple retenu, la courbe peut être considérée comme devenant une courbe de dilution en dessous de pH 2,3 ; la vase a donc échangé ses cations contre 53 ml de ClH N/20, soit # 2,65 mé. Comme il y a, au départ, 20 g de vase fraîche correspondant à 3,14 g de vase séchée, cela nous donne environ 0,84 mé. par gramme de vase séchée.

De différents essais pour mettre en évidence la capacité totale d'échange, en particulier en dosant les ions H^+ libres sur la vase fraîche par un procédé comparable à celui décrit ci-dessus, il ressort que, dans la vase étudiée, la capacité physique d'échange est saturée par des cations, fer principalement. 0,84 mé. représentent

donc, alors, aussi bien la capacité totale d'échange que la somme des cations échangeables existants.

A titre de comparaison nous relevons, dans le traité de pédologie de DUCHAUFOUR déjà cité et d'après DEMOLON (1952), les capacités d'échange moyennes suivantes, pour les éléments adsorbants du sol :

Acides humiques *sensu stricto*	3,7 mé pour 1 g
Complexe humique	2,6 — —
Montmorillonite	1 — —
Illite...........................	0,3 à 0,5 — —
Kaolinite	0,1 — —

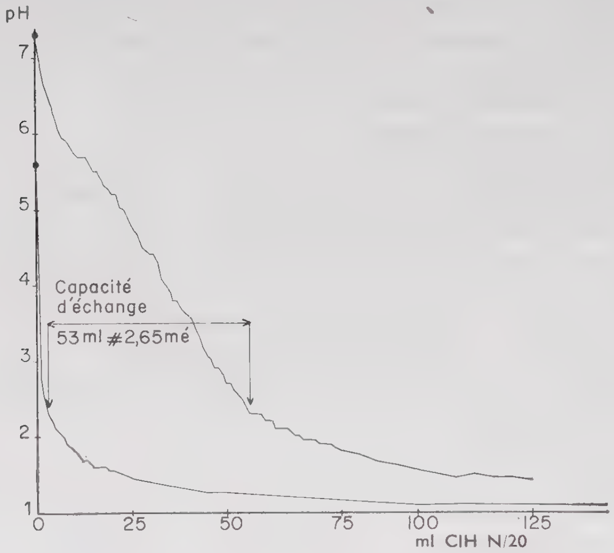

FIG. 8. — *Détermination de la capacité d'échange de la vase par saturation avec ClH* N/20 dans 20 gr. de vase fraîche = 3,14 gr. de vase séchée donc capacité d'échange pour 1 gr. sec # 0,84 mé = somme des cations existant

La valeur trouvée pour la vase de Vézins, compte tenu de la proportion de matières organiques que celle-ci renferme, se place particulièrement bien dans le tableau ci-dessus. Le résultat de la percolation est légèrement inférieur à celui de la méthode décrite en dernier. Celle-ci, retenue pour sa rapidité, semble bien adaptée à une éventuelle étude comparative sur différentes vases.

D. Étude chimique

a) *Généralités*

Une série de dosages a été faite sur la vase fraîche récoltée en profondeur au point 1 et considérée comme le sédiment caractéristique du lac de Vézins. Pour mener à bien ce travail, le point de départ a été le traité publié sous la direction de J. BOURCART : *Technique d'Étude des Sédiments et des Vases qui leur sont associées* (B. BRAJ-

NIKOV, C. FRANCIS-BŒUF et V. ROMANOVSKY [27] 1943). La plupart des techniques d'analyses présentées se sont révélées, pour diverses raisons tenant sans doute à la nature particulière du sédiment considéré, inapplicables pour la vase de Vézins. J'ai dû utiliser soit les méthodes de la pédologie, avec ou sans modification, soit, parfois, les méthodes mêmes de la biochimie courante en les adaptant au problème particulier envisagé.

La teneur en eau ayant été étudiée dans un paragraphe précédent, toutes les valeurs trouvées sont données maintenant par rapport au poids sec. Il est ainsi beaucoup plus aisé de les comparer avec celles obtenues dans la littérature ou avec des valeurs qui pourront être cherchées plus tard sur la vase de même origine, le poids sec pouvant s'obtenir de façon rigoureusement comparable par différents chercheurs, ce qui n'est pas le cas pour l'estimation de l'état « humide » d'une vase ramenée du fond d'un lac.

b) *Le carbone organique*

Plusieurs auteurs, dont J. BOURCART et FRANCIS-BŒUF ([18] (1942), ont attiré l'attention sur le fait, qui avait été négligé par de nombreux géologues, de l'importance des matières organiques dans la vase. La méthode courante, donnant une bonne approximation de la teneur en matières organiques, est celle dite de la perte au feu. La calcination a été faite à 600° au four à moufle. La connaissance de la teneur en carbonate permet de corriger l'erreur provenant de la destruction de ce corps (voir V. BRAJNIKOV, C. FRANCIS-BŒUF et V. ROMANOVSKY [27] 1943). On admet que la teneur en carbone organique est la moitié de la quantité totale de matières organiques trouvées. Sur le lac de Vézins, au point 1, la perte au feu a été de (moyenne) 186,7 g pour 1 kg de vase sèche soit, après correction, 185,9 g de matières organiques, # 18,6 p. 100. Si nous comparons avec les valeurs données par J. BOURCART et C. FRANCIS-BŒUF (*op. cit.*), la vase de Vézins offre un pourcentage de matières organiques tombant dans les valeurs données mais plutôt faible pour une vase lacustre. La teneur en carbone organique est alors estimée à $\frac{185,9}{2}$ # 92,9 g pour un kilogramme de vase sèche.

Pour plus de précision, j'ai aussi dosé directement le carbone organique par une méthode pédologique. La méthode Anne, donnée en annexe par DUCHAUFOUR ([51] 1960, p. 382), s'est révélée directement applicable et sans modifications, à la vase de Vézins.

La quantité de carbone organique trouvée par cette méthode est de 52,275 g pour un kilogramme de vase sèche, donc un nombre très inférieur à celui déduit de la perte au feu. Cette dernière quantité trouvée est cependant à considérer comme plus exacte que celle obtenue par la première méthode.

c) *Les carbonates*

La teneur en carbonate est trouvée par l'utilisation d'un calcimètre dont le principe est bien connu, calcimètre Bernard par exemple. Mais à Vézins, la teneur en calcaire est si faible que j'ai dû, pour faire les mesures, remplacer la chambre de mesure de l'appareil par celle d'un ancien appareil de Van Slyke. Pour éviter les

corrections de pression et de température, l'appareil est alors étalonné avec 0,01 g de CO_3Ca pur (voir DUCHAUFOUR, *op. cit.*, p. 388). La teneur moyenne a été de 1,9 g de CO_3Ca pour 1 kg de vase sèche.

d) *L'azote total*

Un autre constituant de la matière organique est l'azote. Il a été assez souvent dosé dans les vases et les auteurs ont attaché beaucoup d'intérêt au rapport C/N de l'azote au carbone organique. La méthode de dosage utilisée est toujours dérivée de celle de Kjeldahl mais, pour diverses raisons, dont de trop grandes variations dans les résultats sur une série de dosages faite à partir d'un même échantillon homogénéisé ont été les plus importantes, j'ai été amené à utiliser une méthode très différente, dans ses détails, de celles données dans les traités d'étude de la vase ou des sols. Il est indispensable d'augmenter très fortement la quantité de catalyseur utilisée lors de la minéralisation. Pour que celle-ci soit assez rapide et facile à conduire régulièrement sans pertes, il faut travailler sur de petites quantités, ce qui oblige à procéder en semi-microanalyse pour la distillation et aussi pour la précision de la titration finale. Après différents essais, j'ai finalement obtenu des résultats satisfaisants par la méthode suivante :

Préalablement, une certaine quantité de vase est séchée à l'étuve à 110° puis broyée et intimement mélangée. La poudre obtenue est conservée sur dessiccateur et constitue la « vase sèche » des dosages.

Peser 0,200 g de vase séchée à l'étuve et les placer dans un matras. Ajouter 0,600 g de SO_4Cu anhydre et 1,500 g de SO_4K_2 également anhydre ; on évite ainsi la formation de mousse, source de perte de substance, les antimousses aux silicones ne sont pas convenables pour annuler cet ennui.

Ajouter 3 ml de SO_4H_2 concentré et deux perles de verre pour régulariser l'ébullition.

On prépare une série de matras de la même manière plus un sans vase servant de témoin pour un dosage à blanc.

Faire bouillir au bain d'air sur la petite flamme d'un bec BUNZEN convenablement réglé, chauffer lentement au début.

L'appareil à distillation microkjeldahl, modifié par PARNAS et WAGNER, est mis en route et rincé.

Quand la teinte verte apparaît dans le matras contenant la vase, l'ébullition est poursuivie une demi-heure.

Refroidir le matras et diluer avec 2 ml d'eau distillée. Verser quantitativement dans le ballon à distiller et ajouter les quelques millilitres d'eau de rinçage du matras.

Ajouter dans le ballon une quantité suffisante de soude pure (lessive), pour neutraliser l'acide sulfurique, plus un léger excès. Il s'est formé alors un abondant précipité brun foncé qui ne se dissout plus dans la liqueur ; en pratique, il faut un peu moins de 5 ml de soude par ml d'acide versé dans le matras.

Distiller en mettant l'appareil en route avec précaution pour éviter les pertes par projection brutale au départ.

Le distillat est reçu dans une petite fiole d'Erlenmeyer contenant 5 ml d'eau

distillée et 5 ml de solution saturée d'acide borique préparée de la façon suivante :

Solution saturée d'acide borique	1 l
Solution d'indicateur mixte selon P. GRABAR	10 ml

Indicateur mixte :

Solution alcoolique saturée de rouge de méthyle	100 ml
Solution aqueuse de bleu de méthylène à 1 p. 100	4 ml

On distille 9 minutes avec l'extrémité du réfrigérant plongeant dans l'acide borique, puis une minute avec cette extrémité au-dessus de la solution et on termine par un jet d'eau distillée pour rincer l'extrémité extérieure du réfrigérant.

La première distillation est opérée sur le contenu du matras exempt de vase et la teinte intermédiaire obtenue est ensuite utilisée comme teinte de référence pour interrompre les dosages suivants, qui sont faits à l'aide d'une solution N/100 d'acide sulfurique préparée extemporanément à partir d'une solution N/10 très exactement étalonnée.

1 ml de solution N/100 correspond à 0,14 mg d'azote dans la prise d'essai.

Les résultats obtenus par cette méthode se tiennent remarquablement bien. On calcule la moyenne.

A Vézins, point 1, au fond, on trouve 8 g d'azote pour 1 kg de vase sèche soit 0,8 p. 100 d'azote. Comparée aux valeurs trouvées dans la littérature, cette teneur semble forte ; cependant il convient de remarquer que les différents auteurs n'ont pas toujours précisé s'ils donnaient le résultat par rapport au poids sec et que d'autre part, les méthodes de dosage utilisées risquaient de donner des valeurs inexactes, par défaut en général.

Les dosages sur la vase d'eau douce sont très peu nombreux. F. PIERRE [143] (1951), travaillant sur des vases asséchées à faible teneur en eau, a trouvé un maximum de 0,72 p. 100 d'azote dans une vase évoluée en sol des Moëres des Flandres. En général, il a relevé des teneurs de 0,3 à 0,4 p. 100 dans les vases d'eau douce récentes ; les vases d'eau douce apparaissent plus riches en azote que les vases marines.

Le rapport C/N est 6,53. Il est faible par comparaison avec les valeurs moyennes des auteurs, mais cela s'explique par les méthodes de dosage utilisées dans le présent travail. En effet, si nous prenons non pas la teneur en carbone, dosée par la méthode Anne, mais la moitié de la perte au feu, carbone minéral déduit, nous trouvons un rapport C/N de 11,61. Ce dernier rapport est certainement faux, mais comme, pratiquement, la plupart des auteurs ont utilisé la même méthode de la perte au feu pour trouver la teneur en carbone, il peut être comparé aux valeurs publiées et, tout en restant une valeur faible, tombe alors bien dans celles couramment rencontrées.

Si, maintenant, nous calculons l'azote pour cent de la matière organique totale, déduite de la perte au feu, nous trouvons 4,3 p. 100. Comme il fallait s'y attendre d'après ce qui précède, ce pourcentage se classe dans les forts d'après les données de J. BOURCART et C. FRANCIS-BŒUF, mais tombe dans la moyenne des valeurs rapportées par F. PIERRE qui trouve, pour les vases récentes qu'il a étudiées, des pourcentages compris entre 1,5 et 6,9.

D'après J. BOURCART et C. FRANCIS-BŒUF, ce pourcentage indique un très faible apport de matières d'origine animale vis-à-vis de l'apport d'origine végétale.

Le fractionnement de la matière organique sera étudié à part (chap. F).

e) *Le fer et le soufre*

Après la matière organique, c'est le complexe ferrugineux qui mérite l'attention. Là aussi, les études antérieures ont surtout pris, comme sujet, les vases marines. Tous les auteurs cités dans J. Bourcart et C. Francis-Bœuf (*op. cit.*) ont rapporté que, pour ces vases, la couleur noire provient, en partie, du monosulfure de fer (FeS) qu'elles contiennent et en partie des matières organiques. Dans les vases récentes, il ne semble jamais y avoir de pyrite (FeS_2).

Le mécanisme de formation de sulfure de fer est connu (voir à ce sujet R. Desroches et V. Fredette [48] 1960). Il en découle que la couleur noire des vases d'eau douce ne doit pas être attribuée, automatiquement, aux sulfures de fer. D'ailleurs, F. Pierre, dans son étude, n'a pu constater la présence des vases à hydrogène sulfuré que signalent parfois certains auteurs. En fait, il existe véritablement des lacs où l'hypolimnion renferme, pendant la stagnation, une grande quantité d'hydrogène sulfuré en solution. La vase de ces lacs contient alors des sulfures ; il peut même plus fréquemment y avoir des sulfures dans la vase, sans hydrogène sulfuré dans l'eau. L'hydrogène sulfuré ne peut apparaître dans l'eau que si celle-ci est acide et quand tout le fer présent a été précipité à l'état de monosulfure. Si une vase est oxydée ou déposée en milieu oxydant, le soufre qu'elle peut contenir est à l'état de sulfate.

A Vézins, j'ai donc, pour étudier cette question, dosé successivement dans la vase du point 1 : les sulfates, les sulfures et le fer.

Pour les sulfates, la méthode gravimétrique donnée par B. Brajnikov, C. Francis-Bœuf. et V. Romanovsky [27] (1943) se révèle très convenable, elle a aussi été utilisée par F. Pierre qui la déclare pratique. La vase de Vézins ne contient pas de sulfates, aucun trouble ne se forme dans la liqueur finale en présence de chlorure de baryum, un essai en présence d'une petite quantité de sulfate ajouté intentionnellement montrant qu'il n'y a pas d'erreur de manipulation.

Par contre, pour les sulfures, j'ai dû modifier la méthode donnée par ces mêmes auteurs, surtout en raison de la trop forte valeur obtenue avec le dosage à blanc et pour éliminer l'opération de la filtration, toujours longue et source d'erreurs. J'ai placé, dans le barboteur (type Durand, mais on peut utiliser un Maquenne de contenance moindre), 5 ml de solution d'iode N/10, 1 ml d'acide chlorhydrique à 50 p. 100 et de l'eau distillée pour faire 150 ml. Le dosage était conduit comme l'expliquaient les auteurs et, à la fin, le contenu du barboteur est versé, avec ses eaux de rinçage, dans un bécher. L'iode restant est alors titré avec une solution d'hyposulfite de sodium très exactement N/10 suivant la méthode habituelle.

Il est absolument indispensable (comme dans tous les dosages d'ailleurs) de procéder à un dosage blanc, en ne plaçant, dans le récipient à réaction, qu'une petite quantité d'eau distillée.

1° Un blanc trop important indique toujours un mauvais dosage.

2° La quantité d'iode correspondant aux sulfures sera représentée par la différence entre les deux dosages ; il faut donc mesurer chaque fois très exactement le volume de solution d'iode placée dans le barboteur, mais son titre peut n'être qu'approché. Il faut utiliser une microburette pour la verser. Dans ces conditions, 1 ml de solution N/10 correspond à 1,6 mg de soufre. Comme d'habitude et chaque fois que cela est possible, on procédera à une petite série de dosages dont les résultats ne de-

vront pas être trop dispersés pour être retenue. La méthode peut être encore améliorée en remplaçant l'iode par une solution d'acétate de zinc et d'acétate de cadmium.

La vase de Vézins, au point 1, contient 26 mg de soufre pour 1 kg de vase sèche, provenant des sulfures attaquables par un acide étendu (et éventuellement de sulfites et de thiosulfates), pratiquement du monosulfure de fer, soit 71,28 mg de FeS pour 1 kg sec. Cette teneur peut être considérée comme très faible d'autant plus qu'il y a lieu de penser qu'il n'existe d'autre forme du soufre, dans cette vase, qu'en quantité encore bien plus faible.

Pour le dosage du fer, il a été procédé selon la méthode suivante :

Partir de 1 à 2 g d'échantillon pesé sec et calciné au four pendant deux heures, à 600°. Mettre le résidu refroidi de la calcination dans un Erlenmeyer avec 10 ml d'eau distillée et 10 ml de SO_4H_2 concentré. Faire bouillir à reflux aussi longtemps que l'oxyde ferrique ne s'est pas totalement dissous (décoloration de la matière pulvérulente).

La solution est recueillie dans un ballon jaugé de 1 000 ml, par décantation et lavages successifs. On ajoute 2 ml de SO_4H_2 concentré et 2 ml de solution saturée de persulfate de potassium, puis on ajuste à 1 000 ml. Cette liqueur est utilisée pour la colorimétrie au sulfocyanure comme une eau naturelle. Le fer trouvé est ramené à 1 kg de vase sèche.

La vase de Vézins, au point 1, contient 60,2 g de fer dans 1 kg de vase sèche, soit une teneur de 6,02 p. 100 particulièrement élevée, mais non anormale, par rapport aux valeurs trouvées dans la littérature et correspondant bien à l'idée du « piège à fer » que l'étude chimique de l'eau du lac a mis en évidence.

Le rapport C/Fe est de 0,86. Ce rapport a déjà été étudié par C. Francis-Bœuf pour les sédiments vaseux de la Loire et par F. Pierre. En raison de la forte teneur en fer à Vézins, nous tombons ici à un rapport beaucoup plus faible que ceux rencontrés par ces auteurs.

La forte proportion de fer dans la vase de Vézins, celui-ci étant considéré comme faisant partie, en totalité ou presque, de la phase active de la vase telle qu'elle se dépose au fond du lac, peut expliquer la fluidité particulièrement grande de cette vase.

f) *Le manganèse*

A titre indicatif, j'ai cherché également à doser le manganèse. Je n'ai pas trouvé, dans la littérature, de données sur la teneur de ce corps dans des vases, ni de méthode de dosage spécialement adaptée à ce cas. J'ai donc dû procéder à des essais pour mettre au point, d'après les méthodes générales, une méthode simple et convenant à ce cas particulier.

— Calcination, 2 heures à 600°, du sédiment séché à l'étuve et calcul de la perte au feu.

— Le produit est pulvérisé et une prise de 0,5 g (il faut avoir moins de 1 mg de Mn dans la prise, ce qui peut amener à modifier cette valeur) est placée dans une capsule. On ajoute 5 ml de SO_4H_2 concentré et le chauffage est poursuivi sur le bain de sable pendant 30 minutes.

— On dilue avec 20 ml d'eau environ et on filtre sur verre fritté n° 3, on ajoute 5 ml de PO_4H_3 et les eaux de rinçage pour obtenir un volume final de 50 ml.

— On ajoute 0,15 g de periodate de potassium et on chauffe 10 minutes

vers 90° ; refroidir, ajuster à 50 ml avec de l'eau distillée et colorimétrer à 530 ou 520 mμ.

— Pour tracer la courbe d'étalonnage on utilise $Cl_2Mn, 4H_2O$ = 197,93 en préparant une solution à 0,1 g litre, soit 360 mg de produit dans un litre d'eau distillée :

10 ml donnent une prise de		1,00 mg
5 ml	—	0,50 mg
2 ml	—	0,20 mg
1 ml	—	0,10 mg

— Chaque prélèvement est placé dans une capsule et est évaporé à sec, puis les 5 ml d'acide sont versés dans la capsule et le traitement est poursuivi exactement comme pour les prises de sédiment, la filtration étant inutile. Faire un blanc et déduire sa valeur lors de chaque mesure.

J'ai trouvé 0,84 g de manganèse pour 1 kg de vase séchée. Faute de valeurs de comparaison dans la littérature, il est difficile d'apprécier ce que signifie exactement cette teneur. P. Duchaufour, dans son précis de pédologie, ne donne pas non plus d'exemples pour les sols, indiquant seulement la nécessité d'un minimum de la forme soluble de cet oligo-élément nécessaire aux plantes et aussi qu'il existe une dose toxique, pour les végétaux, de la même forme assimilable.

g) *L'activité déshydrogénante*

La mesure de l'activité déshydrogénante de la vase n'est plus la recherche d'une teneur mais d'une capacité d'évolution biochimique générale ; c'est une expression de la mesure de la vitesse à laquelle les composés organiques peuvent être dégradés. Comme, pour faire cette recherche, il faut se placer dans des conditions anormales, de température en particulier, la valeur du résultat n'est que comparative, intéressante pour situer divers sédiments les uns par rapport aux autres.

La méthode employée est celle de Lenhard (1956-1957) modifiée (rapportée par G. Lenhard, W. R. Ross et A. du Plooy [117] (1962). J'ai dû, au cours des essais, apporter aussi quelques autres modifications et précisions pour l'application pratique. On part du sédiment frais, simplement égoutté sur filtre et traité le plus rapidement possible après sa récolte.

Dans un Erlenmeyer de 150 ml verser :

10 g du sédiment humide égoutté
100 mg de CO_3Ca
5 ml de chlorure de triphényl tétrazolium (TTC) à 0,5 p. 100 (p/v)
5 ml d'eau distillée.

Agiter, boucher avec une feuille de papier Joseph et mettre à incuber 19 heures à l'étuve à 30 °C.

Après ce temps, verser 50 ml d'éthanol, agiter et filtrer, faire la colorimétrie en lisant la densité optique au spectrophotomètre à 546 mμ. Les résultats peuvent être donnés en micro grammes d'hydrogène nécessaires pour réduire la quantité correspondante de T.T.C.

Établissement de la courbe d'étalonnage : Préparer une solution de T.T.C. Formazan avec 20 mg dans 100 ml d'éthanol. Dans six Erleneyer numérotés verser :

5 g du sédiment humide égoutté
50 mg de CO_3Ca
5 ml d'eau distillée
et la solution de Formazan suivant le tableau

N°	1	2	3	4	5	6
Solution de Formazan..........	0 ml	5 ml	10 ml	15 ml	20 ml	25 ml
Puis de l'éthanol pur...........	25 ml	20 ml	15 ml	10 ml	5 ml	0 ml

Agiter, filtrer et colorimétrer rapidement à 546 mμ en prenant de l'eau distillée comme référence.

Correspondances :

N° 1 : 0 micro-gramme d'hydrogène
N° 2 : 13,32 — —
N° 3 : 26,64 — —
N° 4 : 39,96 — —
N° 5 : 53,29 — —
N° 6 : 66,66 — —

dans la mesure et pour 10 g de sédiment humide égoutté. Lorsque la densité optique trouvée est supérieure à celle donnée par le témoin N° 6, il y a lieu de procéder par dilution, dans l'alcool, du filtrat obtenu pour avoir une lecture tombant dans les limites de la courbe tracée.

Avec la vase ramenée du point 1, le 2 novembre 1963, et étudiée dès le retour au laboratoire, il a été trouvé une quantité de Formazan formé de 11 mg, soit plus de 66,66 microgrammes d'hydrogène. A titre de comparaison, les mesures effectuées sur quatre vases provenant du domaine de la station d'hydrobiologie du Paraclet sont les suivantes :

a) vase provenant de la rivière Noye (zone vaseuse d'une rivière à truites, en plaine, en amont d'un petit barrage) : 0,25 mg de Formazan formé = 1,66 μg d'hydrogène ;

b) vase provenant du bassin de réception des sources du Paraclet (fond tourbeux) : 0,65 mg de Formazan formé = 4,33 μg d'hydrogène ;

c) vase provenant du fossé de la pisciculture, en aval des bassins à truites (vase putride, polluée) : 3,18 mg de Formazan formé = 21,19 μg d'hydrogène ;

d) vase provenant d'un bassin de décantation de l'eau de la Noye avant la pisciculture : 3,20 mg de Formazan formé = 21,33 μg d'hydrogène.

Les deux vases *a* et *b* sont des vases naturelles peu actives ; les vases *c* et *d* sont des vases de pollution, putrides, formées sous une faible épaisseur d'eau. La vase de Vézins, qui ne semble pas touchée par la pollution de Saint-Hilaire-du-Harcouët au

point où elle a été prélevée, apparaît considérablement plus active que les précédentes ; c'est une vase qui a été récoltée en fin de période de stagnation alors que les conditions sont très réductrices. Nous constatons que son activité déshydrogénante est très grande, supérieure à celle de vases dites putrides provenant de zones nettement polluées par des matières organiques dans une rivière peu profonde.

E. La vase dans l'amont du lac

Pour comparaison, quelques dosages ont été effectués au point 3, dans de la vase prélevée à environ 6 mètres de profondeur à partir du pont même. Il a été trouvé 25,5 g seulement de fer par kg de vase sèche, soit moins de la moitié de la teneur en fer trouvée au point 1. La teneur en eau, Th, était sur cette vase de 73,14 p. 100 contre 84,3 p. 100 au point 1. Dans les deux cas, la mesure ayant été faite sur l'échantillon naturel après repos et décantation, la vase du point 3 retient moins d'eau ; elle présente donc une structure plus « amorphe » avec une plus forte proportion de la phase inerte. La perte au feu a été de 14,105 p. 100 contre 18,67 p. 100 donc plus faible teneur en matières organiques ce qui corrobore la remarque précédente. Par contre, il y avait 40 mg par kg sec de soufre des sulfures contre 26 mg au point 1, ce qui est encore attribuable à la pollution des eaux recouvrantes qui agit encore ici ; cependant cette teneur est encore très faible et on ne peut qualifier cette vase de vase à sulfures pour la caractériser.

En amont du lac, au point 3, la vase trouvée renferme une phase active (matières organiques et fer) plus faible, proportionnellement, que celle du point 1 ; la phase minérale est donc, ici, plus importante.

F. Fractionnement de la phase organique des vases

A. — Généralités

On distingue deux phases dans les vases, une phase inerte comprenant principalement les débris minéraux figurés et d'origines diverses, et une phase active comprenant la matière organique et le fer qui sont à l'état de complexe. D'après J. Bourcart et C. Francis-Bœuf [18] (1942), les géologues ont longtemps sous-estimé le rôle de la matière organique dans les vases bien qu'Ehrenberg et, après lui, quelques chercheurs isolés aient depuis longtemps insisté sur son importance. Les dosages globaux de la matière organique totale, du carbone et de l'azote rapportés précédemment, s'appliquent à cette phase des vases. Mais, bien que permettant déjà des comparaisons fort intéressantes, ces résultats sont loin de donner tous les renseignements possibles sur la composition réelle de la phase active. Aussi des tentatives d'investigations plus approfondies ont-elles été faites dès que l'on a compris l'importance de ces matières organiques. La complexité du mélange rencontré est telle que les différents chercheurs ont dû, très longtemps, se borner à une séparation en quelques fractions dont la composition exacte est restée assez mal définie. Récemment, les chercheurs américains, en particulier J. R. Vallentyne, ont abordé le problème de cette analyse chimique sous un autre angle en cherchant à mettre en évidence

des composés chimiques bien définis, par exemple les acides aminés et les sucres, par l'utilisation des méthodes les plus récentes de l'analyse chimique. Leurs publications sont encore fragmentaires et ne donnent pas tous les détails des techniques employées, ce qui amène à faire de nombreux essais et recherches parmi les techniques de la biochimie pour obtenir des résultats comparables. Les rapports étroits entre l'étude des vases et des sols ont déjà été signalés, nous les retrouvons ici ; il n'y a, souvent, que fort peu de différence entre les méthodes d'analyse utilisées dans l'un ou dans l'autre cas.

B. — Les méthodes existantes

La méthode de fractionnement de base est celle décrite par J. Bourcart et Francis-Bœuf [18] (1942) ; elle se résume en une série d'extractions par l'eau froide puis chaude, puis par des solutions basiques et acides. On obtient ainsi une série de fractions qui sont encore des mélanges complexes. D'autre part on doit craindre, avec juste raison, que la méthode employée, assez brutale chimiquement, n'entraîne de grosses modifications dans la nature réelle des substances extraites, cas de la soude bouillante par exemple.

F. Pierre [143] (1951), travaillant sur des vases asséchées, tenta de trouver une méthode l'amenant à des composés chimiques définis. Sur les conseils de G. Champetier, il utilisa une série de 7 extractions, mais les circonstances ne lui ont pas permis d'étudier suffisamment d'échantillons pour pouvoir faire des comparaisons utiles et il n'a rapporté ses résultats que pour le dosage des seuls lipides ternaires et des pigments. Il est, là aussi, probable que la suite des opérations entraîne une modification de quelques-unes au moins des substances présentes. il semble d'ailleurs presque impossible d'éviter cet inconvénient.

C'est dans l'ouvrage d'un pédologue, Ph. Duchaufour [51] (1960), que nous trouvons exprimées le plus clairement les grandes lignes de la composition de la matière organique du sol qui, de toute évidence, peuvent s'appliquer exactement à la matière organique des vases. Nous distinguons donc aussi 4 grandes divisions.

1° Les *débris* encore peu attaqués *à structure organisée.*

2° Les *produits intermédiaires* : par exemple la lignine libérée par disparition. de la cellulose plus attaquable.

3° Les complexes colloïdaux formés par synthèse microbienne ou d'origine résiduelle. C'est l'*humus proprement dit* ou fraction humifiée de la matière organique

4° Les *composés solubles* se minéralisant (ou se polymérisant) plus ou moins rapidement.

Il n'est déjà pas possible de séparer ces quatre portions entre elles de façon sûre et précise ; on a fait appel à des méthodes basées sur la différence de densité des matières fraîches et des autres qui, plus lourdes, sont entraînées avec la phase minérale.

Parmi les corps précédents, ceux de l'humus proprement dit sont les plus intéressants, par leurs propriétés diverses, mais sont aussi les plus mal connus. La première évidence qui s'impose est que l'extraction des acides humiques varie essentiellement avec le réactif d'extraction et donne alors des résultats non comparables. Pour

les sols, ces composés humiques ou acides humiques au sens large, extraits suivant une méthode unique, varient beaucoup d'un sol à l'autre ; il faut donc s'attendre au même résultat avec les vases. De nombreux auteurs, américains et russes principalement, ont attaqué le problème pour les sols. Ils distinguent en général :

— *des acides fulviques* solubles dans les solutions alcalines et non précipitables par SO_4H_2 ; ce groupe est à nouveau fractionné et se résout finalement en

acides organiques
composés phénoliques
uronides
et polysaccharides en chaînes

— *des acides humiques (sens strict) et des précurseurs des acides humiques* : ils sont solubles dans les solutions alcalines et précipitent ensuite par SO_4H_2. Le deuxième fractionnement varie beaucoup avec les auteurs mais il semble qu'il y ait là des composés à molécule sphérique, à noyaux quinoniques ayant fixé de l'azote sous la forme ammoniacale ou aminée (parfois hétérocyclique) ;

— *des polyuronides et polysaccharides* : c'est la fraction humifiée non soluble dans les solutions alcalines. Leurs molécules sont des chaînes allongées qui peuvent être souvent rompues par hydrolyse.

Les corps précédents sont presque tous susceptibles d'être rencontrés à l'état de complexes avec le fer et l'aluminium. Il apparaît que ces complexes se rencontrent dans les sols surtout en l'absence de calcium, ce qui rappelle les observations faites sur la chimie du fer dans le lac et la vase de Vézins, où le fer joue le rôle tenu en général par le calcium.

Il ne semble pas possible de pousser beaucoup plus loin les analogies entre les sols et les vases. En effet, les milieux où se font les évolutions de ces formations se révèlent très différents, même la comparaison avec un sol saturé d'eau ne montre pas une identité étroite. Cette façon de faire est cependant fructueuse, elle indique une recherche plus avancée et donne une liste assez complète des corps susceptibles d'être présents et qu'il convient de rechercher. L'application directe des méthodes de la biochimie, pour extraire successivement des catégories de composés connus, à partir de portions différentes d'un même échantillon homogénéisé d'une vase, devrait nous permettre d'éviter le principal écueil qui est la modification des composés existants par les extractions répétées. En effet, s'il est possible de trouver une extraction modifiant le moins possible le corps que l'on désire obtenir, il est exceptionnel de ne pas agir sur les fractions restantes, et il peut être considéré comme certain qu'à la fin d'une série d'extractions les derniers corps obtenus sont très modifiés. D'autre part, les coupures opérées sont obligatoirement très artificielles et correspondent surtout à un usage qui reste très pratique pour opérer assez rapidement une classification des sols étudiés et connaître leurs propriétés globales.

Sans avoir exprimé l'idée précédente, les chercheurs américains ont ouvert la voie dans ce sens. J. R. Vallentyne (166) (1955) donne un résumé des résultats à cette date. Les acides aminés ont été recherchés dans des sédiments de lacs et d'étangs. On trouve pratiquement la même liste que dans l'eau et le seston supérieurs, surtout les acides suivants : aspartique, glutamique, alanine, leucine et isoleucine et un cinquième, fréquent, qui n'a pas été exactement identifié. Les sucres

libres étaient toujours trouvés à une teneur variant de 24 à 72 mg/kg de poids sec de sédiments. On a trouvé du glucose puis galactose, arabinose, xylose et ribose. Des sucres libres ont aussi été découverts dans des sédiments âgés de 5 000 à 9 000 ans (1 à 11 mg/kg de poids sec). Les pigments caroténoïdes et les chlorophylles ont été, aussi, cherchés et trouvés, les chlorophylles n'étant probablement pas identiques à celles des plantes fraîches ; elles ont été retrouvées, cependant, dans des sédiments anciens de 11 000 ans. La myxoxanthine, pigment caractéristique des algues bleues, permet, dans une carotte de vase, de mettre en évidence l'existence de ces algues pendant une certaine période passée, ce qui ne pouvait être fait autrement, le carbone ^{14}C permettant de dater les mêmes niveaux il y a là une méthode d'intérêt certain en géologie. Dans une publication plus récente de J. R. Vallentyne et J. R. Whittaker [169] (1957), quelques oses sont ajoutés à la liste des sucres libres, maltose principalement puis saccharose, fructose et deux sucres non identifiés.

C. — Recherche des acides aminés dans la vase de Vézins (Point 1)

Ce sont des acides aminés totaux qui sont recherchés, donc après hydrolyse. En effet, le métabolisme bactérien aboutit bien à une libération continue de ces corps, mais ceux-ci sont aussitôt utilisés ce qui fait que, pratiquement, pour arriver à une mise en évidence d'acides aminés libres, il faut traiter une quantité plus importante de vase et il y a lieu de croire que la liste trouvée serait la même, les proportions seules étant différentes.

1° *Méthode*

(Sa mise au point m'ayant demandé de nombreux essais, souvent décevants, je pense qu'il peut être utile, pour d'autres chercheurs, de la donner *in extenso*.)

Hydrolyse préalable.

a) L'hydrolyse acide donne, en général, de plus grandes quantités d'acides aminés mais détruit, en particulier, tout le tryptophane.

50 g de vase fraîche égouttée sur filtre, décarbonatée s'il y a lieu,
40 ml d'eau distillée,
60 ml d'acide chlorhydrique, $d = 1{,}12$, fumant, p. an,

sont placés dans un ballon, sous réfrigérant à reflux et au bain-marie, ou bien dans un tube scellé, et sont chauffés 24 heures à 100°.

b) L'hydrolyse enzymatique est moins brutale. Elle aboutit à une plus petite quantité d'acides libérés mais à la mise en évidence du tryptophane, s'il existe.

50 g de vase fraîche égouttée sur filtre
50 ml d'eau distillée
1 g de trypsine

sont placés dans un Erlenmeyer à l'étuve à 37°, pendant 48 heures. Le pH a été préalablement amené à 7,5.

— En fin d'hydrolyse, le produit est filtré sur verre fritté n° 3, sans s'aider du vide, et le résidu est rincé plusieurs fois avec de l'eau distillée.

— Dans l'hydrolyse enzymatique, c'est cette solution qui est passée sur la colonne échangeuse d'ions.

— Dans l'hydrolyse acide, il faut préalablement enlever au moins la plus grande partie de l'acide présent. Dans ce cas, le filtrat est évaporé à sec sous vide et repris par un peu d'eau distillée. L'évaporation à sec peut être répétée trois fois au total, avec reprise par un peu d'eau distillée. Pour terminer, une nouvelle filtration sur verre fritté n° 3 permet d'éliminer certaines impuretés dont le départ de l'acide a diminué la solubilité (humine). La solution obtenue est alors passée sur la colonne échangeuse de cations.

La colonne ayant été éluée par l'ammoniaque normale, l'éluat qui renferme les acides aminés est évaporé sous vide et repris par 5 ml d'eau distillée contenant 10 p. 100 d'alcool isopropylique. C'est cet extrait purifié qui est utilisé pour la chromatographie sur papier.

Manipulations de la colonne de résine : Amberlite I. R. 120 A. G.

La résine, conservée sous la forme RNa est mise sous la forme RH avant son utilisation.

— Passage d'une solution de ClH 2N jusqu'à baisse du pH de l'effluent (pH = 1 env. au papier pH universel de Merck), soit après passage de près de 100 ml de solution.

— Rinçage de la colonne par 150 ml d'eau bidistillée.

— *Utilisation* : La solution d'acides aminés, qui doit être légèrement acide, est passée sur la colonne à la vitesse de 1 ml minute.

— Rinçage de la colonne avec 100 ml d'eau bidistillée.

— *Élution* : passage de 300 ml de solution d'ammoniaque normale à la vitesse de 1 ml/mn. L'éluat contient des acides aminés.

— *Recyclage de la résine* :

1° Rinçage avec 100 ml d'eau distillée.

2° Saturation par passage de 300 ml de solution normale de ClNa.

3° Rinçage par 100 ml d'eau distillée.

4° Passage de la solution de ClH 2N jusqu'à virage de pH.

5° Rinçage par 100 ml d'eau distillée.

6° Passage de 300 ml de solution normale de ClNa.

7° Rinçage par 150 ml d'eau bidistillée et attente, sous eau distillée, pour réemploi.

Préparation des solutions.

ClH : 200 g ClH p. an., à 35-36 p. 100 dans H_2O *QSPF* 1 000 ml;

Ammoniaque : 83 ml d'ammoniaque p. a. RP dans H_2O *QSPF* 1 000 ml;

ClNa : 60 g par litre de ClNa cristallisé pur ;

L'eau distillée utilisée est obtenue par échange d'ions.

Chromatographie proprement dite (de partage, sur papier).

— C'est la méthode descendante qui est utilisée. Le papier Arches n° 302, qui donne de bons résultats, est seul utilisé pour la bonne comparaison des essais.

Le papier est préparé à la dimension adéquate au type de cuve utilisée, la ligne de départ et les points de dépôts sont matérialisés par des marques au crayon à mine de graphite uniquement ; le papier n'est manipulé qu'à l'aide de pinces ou de gants, les empreintes digitales apparaissant lors de la révélation finale.

— Le volume déposé à la micropipette dépend de la concentration des produits recherchés. Il peut être intéressant de poser des taches de départ avec des concentrations différentes. 0,01 ml est un volume qui se dépose avec assez d'aisance, en une tache suffisamment petite pour obtenir de bons résultats. La solution est déposée par petites fractions successives, en séchant entre chaque dépôt.

— Les feuilles sont placées dans la cuve au fond de laquelle a été disposé un couvercle de boîte de Petri contenant une solution ammoniacale obtenue par dilution de 1 ml de solution commerciale p. a. dans 1 000 ml d'eau distillée ; elles sont abandonnées pour saturation pendant 24 heures dans une étuve réglée à 22°C. Une trop longue durée de ce stade entraînant parfois, l'élargissement des taches de départ, il y a lieu d'en tenir compte pour des essais successifs.

— Au bout de ce temps, le solvant est versé dans la cuvette spéciale. Pour la routine, c'est le solvant phénol qui est utilisé. Sa préparation est faite d'après E. LEDERER ([109] 1960).

— Avec la cuve utilisée, la migration du solvant dure 24 heures.

— Puis les feuilles sont séchées à l'étuve, 10 minutes à 100-105°. Un premier examen peut être fait ensuite rapidement, en lumière ultraviolette. Le révélateur utilisé est une solution de ninhydrine ; le calcul du R_F se fait au mieux par l'utilisation d'un grand tableau muni d'une réglette transparente mobile.

Les R_F.

1° *Avec le solvant phénol.* — Bien que le travail soit toujours fait à 22°C dans une étuve de précision, on note souvent de petites différences dans les R_F mesurés. En particulier, le R_F trouvé pour un témoin isolé est toujours inférieur à celui caractérisant le même corps dans un mélange. Le contrôle se fait alors par l'emploi de témoins « internes ». Ajoutés au mélange, ils doivent se superposer exactement au corps supposé connu en en renforçant la tache.

TABLEAU 17

R_F moyens, trouvés pour les corps aminés suivants révélables sur les chromatogrammes développés avec le phénol

Acide aspartique	0,19	Asparagine	0,44
Acide glutamique	0,33	Isoleucine	0,83
Sérine	0,36	DL-alanine	0,51
Glycocolle (= Glycine)	0,40	DL-tryptophane	0,82
L-tyrosine	0,58	Acide cystéique	0,08
Alanine	0,58	Cystine	0,30
L-arginine	0,80	Histidine	0,69
DL-valine	0,72	Hydroxyproline	0,70
DL-leucine	0,80	Acide amino *iso*-butyrique	0,67
DL-phényl-alanine	0,88	Thréonine	0,50
DL-proline	0,89	Méthionine	0,82
L-glutamine	0,17	Lysine	0,52

2° *Avec le solvant* n-*butanol/acide acétique.* — Dans le but de séparer des corps présentant un même R_F, on est amené à utiliser un deuxième solvant dans lequel les R_F trouvés seront différents. J'ai utilisé, pour ce faire, le solvant : *n*-butanol 40 + acide acétique 10 + eau 50, v/v (donné par E. LEDERER [109] 1960).

La révélation est faite comme après l'utilisation du solvant phénol.

TABLEAU 18

RF moyens trouvés pour les corps aminés suivants révélables sur les chromatogrammes développés avec le solvant n-*butanol/acide acétique saturé d'eau*

Isoleucine	0,58	Acide aspartique	0,22
DL-alanine	0,30	Acide glutamique	0,28
L-glutamine	0,15	Sérine	0,21
DL-tryptophane	0,53	Glycocolle (= glycine)	0,22
Acide cystéique	0,02	L.-tyrosine	0,43
Cystine	0,03	Alanine	0,34
Histidine	0,07	L-arginine	0,24
Hydroxyproline	0,13	DL-valine	0,52
Acide amino *iso*-butyrique	0,28	DL-leucine	0,66
Thréonine	0,15	DL-phényl-alanine	0,60
Méthionine	0,38	DL-proline	0,31
Lysine	0,07	Asparagine	0,13

En plus, les différents corps prennent des colorations parfois spéciales qui aident à les localiser, coloration jaune pour la proline et l'hydroxyproline par exemple, plus ou moins violacée pour les autres. Certains corps peuvent donner une deuxième tache plus faible, dans le solvant au butanol en particulier.

Pour les meilleures séparations et identifications, j'ai pratiqué, en dernier lieu, la chromatographie à deux directions avec les deux solvants précédents. Le papier est le même, Arches 302, la température 22°C (± 0,5°). Pour la netteté des taches, il est intéressant de réduire, et le volume de départ, et le trajet parcouru par le solvant, le plus possible. J'ai ramené ainsi ce trajet à 20-25 cm depuis la ligne de départ des mélanges ; le volume de la goutte initiale dépend de la concentration obtenue dans l'extrait à chromatographier. La durée de chaque développement se trouve alors être de 10 heures environ, les temps de saturation préalables étant de 24 heures au minimum, en général 38 heures entre les deux développements. Après le premier, les feuilles sont simplement séchées à l'étuve avant d'être replacées perpendiculairement dans leur cuve. L'expérience a montré qu'il y avait intérêt, à cause des impuretés restant dans les solvants ou le papier, à opérer en premier avec le solvant *n*-butanol/acide acétique et qu'il n'y avait alors pas d'inconvénients à faire le deuxième développement dans la même cuve, ce que l'on évite en général lorsque c'est possible.

Malgré toutes les précautions, il est rare que le front du deuxième solvant migre de façon absolument horizontale et les R_F trouvés sont aussi variables autour d'une valeur moyenne, mais la position relative des différents corps reste toujours la même.

La planche n° 5 représente une carte des principaux acides aminés des vases étudiées dans les conditions données ci-dessus. En augmentant le volume de la tache

de départ, on fait apparaître des taches supplémentaires de corps peu abondants, mais les taches des corps principaux s'étalent alors beaucoup et les chromatogrammes deviennent peu lisibles.

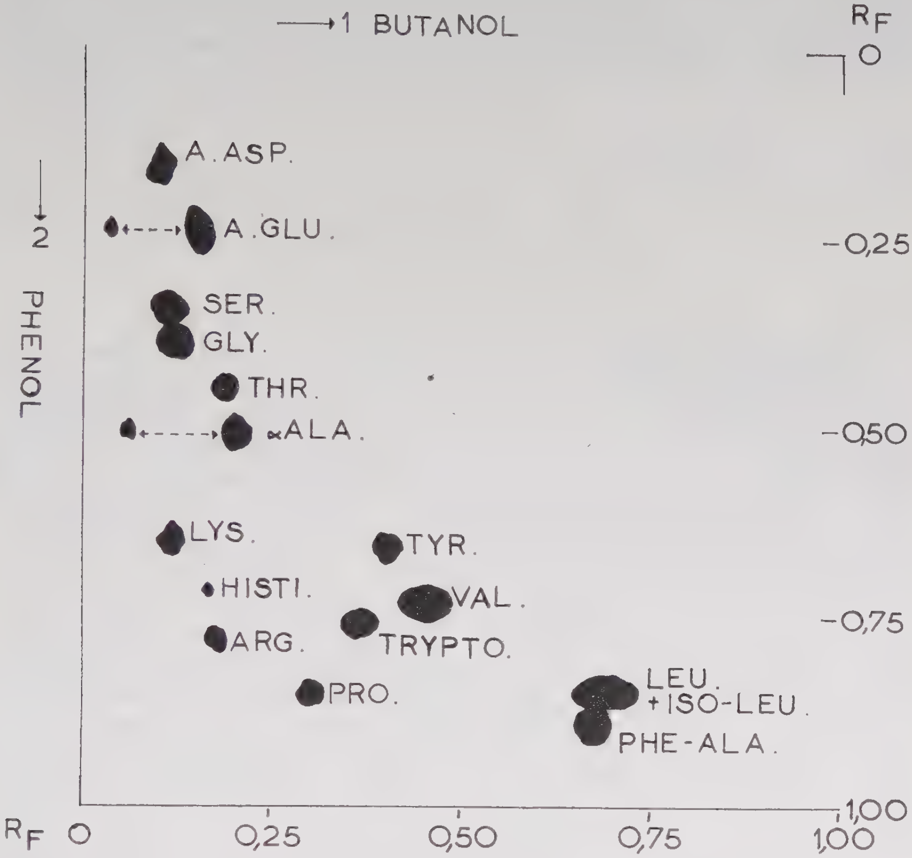

PLANCHE 5. — *Carte des principaux corps aminés de la vase revélés à la ninhydrine sur papier Arches 302, la chromatographie étant faite à 22°C*

2° *Résultats*

Dans la vase de Vézins ont été ainsi identifiés les acides aminés suivants : acide aspartique, acide glutamique, sérine, glycine, alanine, tyrosine, valine, arginine, proline, leucine et isoleucine, phényl-alanine, lysine, thréonine, histidine et tryptophane.

La liste ainsi établie est donc nettement plus longue que celle des chercheurs américains. A titre de comparaison, j'ai également procédé à l'analyse d'une vase provenant d'un étang de pisciculture de la station d'Hydrobiologie du Paraclet. Bien que cette matière première soit manifestement très différente de celle originaire du lac de Vézins, aucune différence n'apparaît dans la liste des principaux acides aminés, même les proportions semblent, au seul examen visuel des taches, être pratiquement les mêmes. L'intérêt de la recherche des acides aminés de la vase,

simplement pour en tirer une méthode de classification, semble donc se réduire beaucoup. En revanche, la présence de quantités importantes d'acide aspartique dans les deux vases, de Vézins et de l'étang de pisciculture, peut indiquer une origine végétale dominante, ce qui est certain dans le cas de la vase d'étang renfermant une grande quantité de débris végétaux supérieurs et donc très probable pour celle de Vézins ; les algues du plancton seraient alors les responsables de l'existence de la plus grande partie de la matière organique de cette vase. Notons que l'étude du rapport $\frac{C}{N}$ avait conduit à la même conclusion.

D. — L'étude des lipides

1° *Méthodes*

Cette recherche nécessite une mise au point non moins longue que pour les acides aminés. Il est aussi souvent plus difficile de trouver dans le commerce les échantillons témoins nécessaires. Jusqu'à présent je n'ai pu arriver qu'à la recherche des acides gras qui présentent d'ailleurs un intérêt particulier expliqué à la fin du chapitre. Après différents essais je suis arrivé, en combinant des méthodes diverses et avec certaines modifications, à établir la marche à suivre suivante qui me donne satisfaction (comme celle des acides aminés, je pense que sa description complète pourra rendre des services).

Il faut, en premier lieu, extraire la « fraction lipoïdique ». Le point de départ idéal serait de pouvoir lyophiliser la vase, pour avoir un échantillon sec mais dans lequel les corps organiques les plus labiles ne seraient pas modifiés. Ne disposant pas de l'appareillage nécessaire, je procède de la façon suivante :

Partir de 150 g de vase fraîche égouttée, la mettre à geler en étuve froide. La faire ensuite dégeler rapidement à faible température et centrifuger. En répartissant la vase du départ dans des capsules, on obtient des galettes qui dégèlent en quelques minutes à la simple proximité d'un radiateur. La structure primitive de la vase est détruite par ce procédé, on obtient une séparation importante entre de l'eau et un culot de centrifugation que l'on place dans la cartouche de l'extracteur et qui se laissera beaucoup plus facilement pénétrer par les solvants que la vase brute ; l'élimination d'une grande partie de l'eau que la vase retient normalement est aussi favorable à une bonne extraction.

Il faut ensuite utiliser un extracteur de Soxhlet et extraire par l'alcool jusqu'à ce que l'alcool filtrant sorte presque incolore, soit pendant 8 heures environ avec l'extracteur de 250 ml utilisé. En fin d'extraction, l'alcool est évaporé sous vide dans un évaporateur rotatif, le séchage est terminé dans une étuve à vide. L'extracteur est séché. Si, à ce stade, une attente ne peut être évitée, la cartouche est conservée, comme le ballon, dans un dessiccateur, au froid et à l'abri de la lumière.

On procède ensuite à une deuxième extraction avec du benzène anhydre ; l'extraction est poursuivie jusqu'à ce que le benzène filtrant sorte incolore, durée de 8 heures environ avec l'appareillage utilisé. Ensuite, le benzène est mis dans le ballon déjà utilisé et l'évaporation sous vide est poursuivie de la même manière.

Le résidu final de l'évaporation est repris par de l'eau distillée et salée avec

6 p. 100 de ClNa, 2 volumes, et par 3 volumes de chloroforme. Il se forme deux phases qui sont séparées. La phase organique est lavée trois fois avec de l'eau distillée salée fraîche, les substances lipoïdes restent dans cette phase.

Le chloroforme est mis dans un petit récipient taré et est évaporé à sec, à 50°C, sur une platine chauffante pour microscopie par exemple et sous un jet d'azote pour éviter l'oxydation de l'extrait lipoïdique qui contient les lipides et les substances lipoïdes (stérols, pigments, résines, etc.). Par pesée du récipient après l'évaporation, on peut calculer le poids de cet extrait.

Pour la vase de Vézins au point 1, j'ai ainsi trouvé un poids de 12,22 g d'extrait lipoïdique par kg de vases séchées, soit 1,222 p. 100. Il est intéressant de se rappeler que les produits ainsi pesés peuvent comprendre des hydrocarbures et des substances que l'évolution lente naturelle pourrait amener à composer des pétroles.

Analyse de l'extrait lipoïdique.

On procède, en premier, à une saponification. Pour cela, on chauffe sous un réfrigérant à reflux, qui peut être constitué par un long tube utilisé spécialement pour les saponifications, et pendant un temps que mes essais m'ont amené à fixer à quatre heures, la substance augmentée de 20 fois son poids de potasse alcoolique à 5 p. 100 (préparation : la potasse est dissoute dans un minimum d'eau, on complète avec de l'alcool à 96°).

En second lieu, il faut fractionner le résultat de la saponification et le purifier. Suivant les volumes de solution à traiter, ce travail est poursuivi dans une ampoule à décanter ou dans des tubes de centrifugeuse en pipetant les phases.

On ajoute 1 volume d'éther de pétrole. Il se forme une solution unique qui est agitée, on ajoute 1 volume d'eau et il se forme alors deux phases : la phase intérieure, hydroalcoolique, est extraite 2 fois par agitation avec de l'éther de pétrole, l'éther de lavage est ajouté à la phase éther ; la phase supérieure, éthérée, est lavée deux fois avec de l'eau qui est ajoutée à la phase hydroalcoolique.

L'éther est évaporé sous vide ; il reste, dans le récipient, la fraction *insaponifiable* qui comprend : les alcools insolubles dans l'eau (stérols, alcools des cérides à poids moléculaire élevé), des hydrocarbures (carotène...), diverses substances peu connues, insolubles dans l'eau formant l'insaponifiable X.

La phase hydroalcoolique renferme principalement les savons de potassium des acides gras, elle est acidifiée par l'acide chlorhydrique, puis agitée 3 fois successivement avec de l'éther ordinaire.

Les fractions éthérées sont réunies puis lavées à l'eau jusqu'à réaction neutre (ceci enlève l'acide chlorhydrique en excès et le chlorure de potassium). La fraction *acide gras* reste dans l'éther, elle renferme les acides gras et des pigments verts (chlorophyllines acides plus ou moins dénaturées en particulier). Une première partie aliquote est concentrée sous vide et servira pour l'étude de la série supérieure des acides gras non volatils et, éventuellement, des pigments.

La fraction *hydrosoluble* reste dans la phase aqueuse, elle comprend : les alcools hydrosolubles (glycérol, alcool éthylique introduit pour la saponification...), des glucides, les produits de décomposition éventuelle des phosphatides, acide chlorhydrique et chlorure de potassium.

L'analyse des acides gras se fait en deux temps selon qu'il s'agit des monoacides

ayant plus de 9 atomes de carbone dans leur molécule ou des acides inférieurs, qui sont volatils et ne peuvent donc être chromatographiés, sur papier, sous leur forme libre.

Les acides de C_9 à au-dessus sont chromatographiés sur papier imprégné d'hydrocarbure supérieur, j'ai choisi l'huile de paraffine (voir pour le détail : LEDERER [109] 1960). On note que les dérivés chlorophylliens donnent ici des taches vert foncé qui se placent au-delà des acides à plus grosses molécules. J'ai obtenu deux taches R_F 0,85 et 0,99 qui doivent correspondre aux deux chlorophyllines provenant des chlorophylles *b* et *a*.

Les acides à moins de 9 atomes de carbone ont été traités de la façon suivante : la saponification étant déterminée, le ballon est adapté à un appareil à distiller et l'alcool est éliminé à 78°C (76 cm de mercure). Il faut, au besoin, ajouter un peu d'eau distillée pour éviter la mise à sec du résidu. Après le départ de l'alcool, on place l'extrémité du réfrigérant dans une solution d'ammoniaque pour analyse, préparée avec 1 ml de solution concentrée dans 10 ml d'eau distillée. On acidifie alors le contenu du ballon, qui a été refroidi, avec de l'acide tartrique à 40 p. 100 et on distille à 100°. Les acides volatils libérés se retrouvent sous la forme de sels d'ammonium dans la solution ammoniacale qui est ensuite concentrée sous vide, à sec, et reprise par quelques gouttes d'eau distillée.

On trouvera, dans LEDERER ([109] 1960), la suite de la méthode de chromatographie. J'ai utilisé le papier Arches 302 qui ne semble pas nécessiter de lavage supplémentaire et deux solvants, le premier à base d'éthanol et le second de butanol normal.

2° *Résultats dans la vase de Vézins*

Les acides gras suivants ont été mis en évidence : en premier lieu les deux chlorophyllines, indiquant qu'il y a de la chlorophylle (*a* et *b*) qui reste un certain temps dans la vase sans y subir une dégradation totale. Ceci est en plein accord avec les résultats des chercheurs américains et ne doit pas surprendre puisque si les chlorophylles sont très instables *in vitro* c'est uniquement en solutions vraies et à la lumière, conditions qui ne sont absolument pas réalisées dans la vase du fond d'un lac. Ensuite nous trouvons les acides non volatils, ceux dont la chaîne est la plus courte étant les plus abondants, l'acide caprique (C_{10}) semble être le plus abondant, puis les acides linolénique et linoléique. Les acides palmitique et (ou ?) oléique et stéarique semblent aussi présents mais en très faible quantité. Enfin il reste toujours, au point de départ des chromatogrammes, une tache présentant les réactions des acides gras et qui doit donc correspondre à des acides à très longues chaînes dérivant de cires. Nous avons par exemple, dans ce groupe, l'acide montanique en C_{29}, dérivant de l'ozokérite, mais je n'ai pas pu identifier sûrement le ou les acides formant cette tache.

La présence de ces acides gras à très longue chaîne, et en quantité qui semble assez importante, est intéressante à connaître dans la vase en raison de l'évolution que les cires peuvent avoir en se fossilisant. D'autre part, d'après M. LEFÈVRE ([112] 1952), SPOEHR a montré que les antibiotiques sécrétés par une algue en culture, *Chlorella pyrenoïdosa*, sont des acides gras ou substances voisines probablement insaturés. On peut espérer trouver des substances comparables dans une vase, comme celle de Vézins, ayant dans sa composition beaucoup de débris phytoplanc-

toniques. L'oxydation de ces antibiotiques les activerait beaucoup. Il serait très intéressant d'essayer l'action éventuelle, sur différentes cultures d'algues, des acides gras séparés par chromatographie après élution des chromatogrammes non révélés.

La recherche des acides C < 9 ne donne que de l'acide acétique. C'était déjà l'acide volatil le plus abondant dans les analyses de plancton mort faites par H. R. Krause (1961) sur du plancton du Titisee. C'est aussi le seul acide volatil que l'on puisse trouver libre dans les bouillons de cultures bactériens et provenant du métabolisme des bactéries. Sa mise en évidence est donc normale, elle n'implique pas de phénomène particulier.

E. — Les glucides

1° *Méthode*

Pour la fraction glucidique, la recherche a porté sur les oses simples libres dans la vase. Une hydrolyse devrait en effet conduire à la mise en évidence d'une grande quantité d'oses provenant de la dégradation de la cellulose et de l'amidon. Je n'ai pas trouvé, dans la littérature, le détail de la méthode utilisée par les chercheurs américains, pour ces corps comme pour les précédents. J'ai donc dû chercher, pour la préparation de l'extrait à soumettre à la chromatographie, une méthode complète à partir de données générales ou fragmentaires.

Il faut partir de 500 g, au moins, de vases humides qui sont placées dans un erlenmeyer et auxquelles on ajoute de l'alcool éthylique à 95° de façon à obtenir, avec l'eau présente, un alcool à 70° environ, puis on ajoute de l'alcool à 70° pour obtenir finalement 100 ml d'alcool par 25 à 30 g de sédiment sec. On laisse au repos 12 heures puis on agite pendant 3 heures, ensuite on filtre, de préférence sur verre fritté et on rince le résidu.

L'extrait ainsi obtenu est alors évaporé sous vide puis repris, par agitations successives, avec un peu d'eau distillée jusqu'à avoir environ 50 ml de solution aqueuse ; il reste un résidu insoluble qui ne doit pas être repris. La solution est passée sur une colonne échangeuse de cations, avec une vitesse d'écoulement très lente ; j'ai utilisé une colonne d'amberlite IR 120 déjà employée pour les acides aminés et qui se traite comme il a été dit au chapitre correspondant. Ici c'est l'effluent qui est recueilli soigneusement et passé à son tour sur colonne échangeuse d'anions avec les mêmes précautions que pour le passage précédent. Les oses neutres se retrouvent dans ce deuxième effluent, la solution est concentrée sous vide et est reprise par 5 ml d'alcool isopropylique à 10 p. 100 qui assure la moins mauvaise conservation des oses neutres pendant la durée des diverses chromatographies venant ensuite. On constate cependant que des acides uroniques peuvent se former très vite dans cette solution.

L'échangeur d'anions utilisé ici était du Dowex 2. Pour l'échange, la résine est mise sous la forme formiate, car la forme OH modifie beaucoup les oses qui la traversent. Le recyclage est réalisé en faisant passer alternativement des solutions d'acide chlorhydrique 0,2 N et de soude décarbonatée 2 N, le passage de chaque solution étant toujours suivi par un rinçage à l'eau distillée. La solution d'acide formique utilisée est 0,5 N.

La chromatographie proprement dite est faite suivant la même technique que

pour les acides aminés. Le papier utilisé et les solvants sont les mêmes. En revanche, la révélation est évidemment différente. On obtient les meilleurs résultats en combinant les trois méthodes : au nitrate d'argent ammoniacal, au phtalate d'aniline et à la *p*-anisidine (préconisée dans *Techniques de laboratoire* ([188] 1963)) qui, appliquées sur des feuilles développées de la même manière, donnent des teintes qui varient avec la nature des oses révélés et permettent donc d'avoir une première idée de la nature des sucres présents.

L'ionophorèse, ou électrophorèse des sucres ionisés (en présence de tampon borate de pH = 8,6), conduit aux mêmes résultats et est aussi un bon recoupement, les feuilles sont révélées comme celles des chromatogrammes.

2° *Résultats*

Je n'ai pu trouver, sur la quantité de vases traitées, que du glucose comme ose neutre ; les chercheurs américains donnent ce sucre comme dominant. Pour avoir une comparaison, j'ai soumis au traitement complet une solution de glucose préparée spécialement, je ne pense pas qu'il y ait eu de pertes de substances lors de ce traitement. Je peux donc en déduire que la teneur de la vase de Vézins, en sucres libres, est de l'ordre des plus faibles, données par les chercheurs cités, soit de 6 mg environ par kg de vase sèche. Cette valeur est trouvée en calculant la dilution qui donne des taches à la limite de détection, c'est donc une valeur simplement approchée mais qui montre bien l'ordre de grandeur.

Les acides uroniques présents à l'origine sont retenus par le Dowex 2, ils en sont élués par l'acide formique 0,5 N qui est ensuite évaporé sous vide. Le résidu est repris par quelques gouttes d'alcool isopropylique à 10 p. 100 et est chromatographié comme ci-dessus.

J'ai trouvé, de cette façon, l'acide glycuronique (ou glucuronique) correspondant au glucose. Cet acide est bien connu des biochimistes car il fait partie des polyosides animaux et bactériens ; dans l'organisme animal il se trouve combiné à de nombreux composés biologiques qu'il contribue à « détoxifier » en donnant des glycuronides. Cet acide n'a pas encore été signalé dans les vases.

On note donc la faible teneur en oses libres et la présence d'un produit susceptible d'être engagé dans d'autres cycles. La source d'oses disponibles étant importante, cela montre que les oses libérés sont repris très rapidement par l'activité, de toute évidence bactérienne, de la vase. Cela recoupe parfaitement les résultats de la mesure de l'activité déshydrogénante rapportée d'autre part. Je souhaite qu'une étude bactériologique de cette vase puisse être entreprise par la suite.

G. Essais de reproduction expérimentale de la formation des varves

a) *Données préalables et hypothèse de travail*

L'origine du lit gris, au niveau de sa plus forte teneur en débris divers, ne peut être située que pendant la saison des plus fortes précipitations et, corrélativement, du plus grand débit de la Sélune et de tous les petits tributaires du lac. Avec quelques légères variations d'une année à l'autre, cette période part de fin octobre début

novembre et se poursuit jusqu'au début de mars de l'année suivante. A la suite, au printemps, c'est le lit à Diatomées pures qui va se déposer à son tour. Le dépôt des carapaces se continue pendant l'été en devenant plus abondant, mais mélangé à une certaine proportion d'autres débris d'origine planctonique : algues vertes ou bleues, zooplancton. La matière organique est attaquée dès la mort des organismes, ce qui a déjà été mis en évidence par plusieurs auteurs (voir G. E. HUTCHINSON [99] 1957 et H. R. KRAUSE [106, 1961) et seules persistent les carapaces siliceuses des Diatomées et celles (tête et valves principalement) des Bosmines ; j'ai observé moi-même ce phénomène à Vézins et il est, d'autre part, déjà rapporté par RUTTNER ([152] 1952). Il y a hydrolyse sous action bactérienne anaérobie car il y a stagnation ; le rH est bas dans l'hypolimnion et les couches profondes correspondantes contiennent une grande quantité de fer ferreux dissous. Les produits résultant des hydrolyses renferment, entre autres corps, des acides aminés et des sucres ; comme cette action se passe principalement sur la vase, et même déjà pendant la chute des cadavres, beaucoup de produits formés diffusent dans l'eau recouvrant directement la vase sur quelques mètres d'épaisseur à partir du fond. Lors de la reprise de la circulation, qui se manifeste assez brutalement sur le fond, le fer précipite en formant des complexes organiques avec les corps présents ; il y a, à ce stade, dépôt rapide d'une couche ferrugineuse organique qui est attaquée à son tour. Cette couche doit former à ce moment une sorte de gelée, d'épaisseur importante d'après les expériences rapportées à la suite ; d'autre part, elle est rapidement recouverte par les premiers apports du lit gris suivant. L'attaque nouvelle a donc lieu aussi en milieu anaérobie, ce qui entraîne une dégradation qui ne va pas jusqu'au stade ultime et une libération de fer ferreux donc très soluble. Ce fer peut diffuser dans la vase, ce qui en général se produit surtout vers le bas dans la partie supérieure du lit à Diatomées.

Lorsque la vase se trouve ramenée à l'air, lors de la vidange du lac par exemple, elle se dessèche et se craquelle, l'air pénètre largement par toutes les fissures et les conditions redeviennent aérobies, le fer redevient ferrique et colore en roux les zones où il se trouve ; la matière organique restante, amenée à un stade de mélange complexe par l'action bactérienne, forme le lit noir resté en place.

Les anomalies de la microstratification de la vase, signalées (L. DANGEARD [44] 1953), s'expliquent alors aisément. Les lits roux étant considérés comme d'origine secondaire, par migration du fer, peuvent être rencontrés à un niveau qui n'est pas obligatoirement toujours le même et qui dépend en particulier de l'épaisseur des lits à traverser ; la présence du lit noir sur le lit roux, et non plus dessous, s'explique aussi aisément. L'absence du lit noir s'expliquera parce que l'année correspondante la totalité de la matière organique formée aura été détruite et solubilisée avant l'établissement des conditions d'anaérobiose nécessaires à sa conservation. Les divisions plus fines du lit gris correspondent, de toute évidence, à des alternances de calme et de grandes précipitations dans l'automne des années considérées.

Les lits roux contiennent des grumeaux bruns et des restes de Diatomées (L. DANGEARD *op. cit.*) ; ils correspondent, en effet, à la partie supérieure du lit à Diatomées au moment où la sédimentation de ces algues est combinée avec celle d'autres organismes, il peut rester alors un peu de matière organique, par exemple restes d'algues, comme des *Microcystis*, très peu modifiées comme j'ai pu en retrouver dans la vase fraîche. La zone est colorée en roux secondairement comme il a déjà été expliqué plus haut.

Dans la vase fraîche remontée à la benne, bien que les lits soient assez mélangés, on peut distinguer des parties grises et des parties noires, tandis que les Diatomées, en raison de la disposition lamellaire des *Fragilaria*, donnent un aspect brillant comparable à celui présenté par des paillettes de mica. Une zone rousse n'est visible que sur une très faible épaisseur et seulement en surface, lorsque l'eau recouvrante contient un minimum d'oxygène. Il serait certainement très difficile alors de distinguer, par une simple observation optique, même sur des carottes remontées sans accidents, la limite exacte entre le lit à Diatomées et le futur lit roux ; il n'y a qu'une transition progressive entre eux.

b) *Méthode*

Afin de contrôler le bien-fondé des phénomènes supposés existants, décrits ci-dessus, une série d'expériences a été réalisée.

Le montage est obtenu à partir de récipients à réaction en pyrex, à rodages interchangeables normalisés et à tubulures multiples, mis récemment sur le marché. Ce matériel permet d'isoler parfaitement le milieu étudié de l'air extérieur, ainsi qu'une observation visuelle continue.

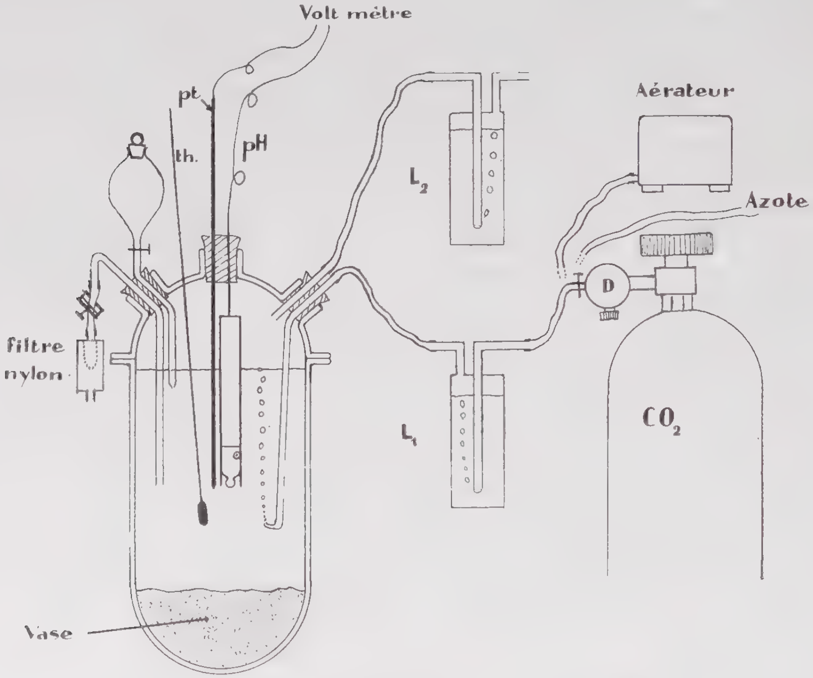

FIG. 10. — *Montage pour étude en milieu de rH contrôlé*

Aux tubulures d'un vase de deux litres sont adaptés successivement (voir fig. 10) : le thermomètre rodé spécial dans sa position normale puis, sur la première tubulure latérale, un bouchon de caoutchouc à deux trous qui reçoit un tube effilé permettant une arrivée de gaz à mi-hauteur du vase et un tube ouvert pour le départ du surplus de gaz à partir du haut du récipient. Le gaz choisi arrive en traversant un premier

flacon laveur rempli d'eau distillée, il peut être purifié s'il y a lieu. Le laveur joue en même temps le rôle de compte-bulles, ce qui permet d'assurer un débit régulier. Le tube de départ est relié à un deuxième laveur, identique au premier, qui sert de soupape et contrôle l'absence de fuites au montage. La deuxième tubulure latérale du réacteur reçoit un entonnoir à robinet pouvant être utilisé pour ajouter un liquide connu en cours d'expérience sans modifier l'atmosphère créée, et un tube plongeant dont la partie supérieure est recourbée et prolongée par un petit tube de caoutchouc, serré par une pince, permettant de prélever un échantillon du liquide dans le montage avec le minimum de perturbation, la simple pression des gaz faisant sortir le liquide. Par la tubulure centrale sont introduites, au travers d'un bouchon de caoutchouc, une électrode coaxiale de pH et une électrode de platine brillant à longue tige que j'ai construite moi-même et dont la position en hauteur peut être aisément modifiée ; elle est, en principe, plongée au même niveau que l'électrode de verre. Ces électrodes sont reliées à l'appareil de mesure pour pH et rH, déjà utilisé sur le terrain. Si on laisse un repos entre deux séries de mesures, les électrodes sont enlevées, nettoyées et conservées dans de l'eau distillée, tandis que l'orifice de la tubulure est obturé par un bouchon de verre rodé.

Le réacteur reçoit de la vase fraîche sur une hauteur de 5 cm environ, puis celle-ci est recouverte d'eau avec précautions, en versant le long d'une baguette de verre et, au besoin, sur un disque de tissu si la vase n'apparaît pas assez cohérente, de façon à ce qu'il y ait le minimum en suspension ; puis l'appareil est fermé. L'eau utilisée est de l'eau provenant du lac de Vézins, prélevée en surface au point 1 et, dans la mesure du possible, le même jour que la récolte de vase ; ceci ne semble d'ailleurs pas indispensable, ce qui compte c'est que l'eau ne contienne pas, au départ, des corps dans une proportion où ils ne sont jamais trouvés dans le lac et, en particulier, il faut avoir une très faible teneur en calcium. Au départ, l'eau est saturée en oxygène pour sa température et ne contient que des traces de fer et de sulfate et pas de manganèse.

c) *Essais*

En premier lieu, l'eau surmontant la vase est amenée progressivement à des conditions proches de celles rencontrées dans l'hypolimnion pendant la stagnation, donc en suivant les résultats trouvés dans l'étude chimique, en la saturant de gaz carbonique qui va déplacer l'oxygène existant par barbotage. Au départ, puis de cinq en cinq minutes, la température, le pH et le rH sont relevés et les modifications d'aspect sont soigneusement notées ; lorsque l'équilibre paraît atteint, les mesures peuvent être espacées. La température n'a jamais varié de plus d'un degré pendant les essais et est toujours restée au voisinage de 18°C. Le pH et le rH sont portés suivant deux courbes tracées sur la même abaque en fonction du temps. La rapidité des variations est reliée directement au débit de gaz et il apparaît parfois, dans les courbes trouvées, de petites anomalies liées à des variations accidentelles de ce débit ; en répétant les essais plusieurs fois, il est possible de tracer, finalement, une courbe-type moyenne dans laquelle ces petits défauts sont éliminés. Une telle courbe est représentée sur la planche n° 6. On note, au début, une réduction assez rapide avec un ralentissement net au voisinage de rH 20,7, avec des mesures espacées de 5 minutes ; on trouve toujours ensuite une série de petites irrégularités de faible amplitude qui s'estompent assez vite, une fois le palier inférieur atteint. Le rH du

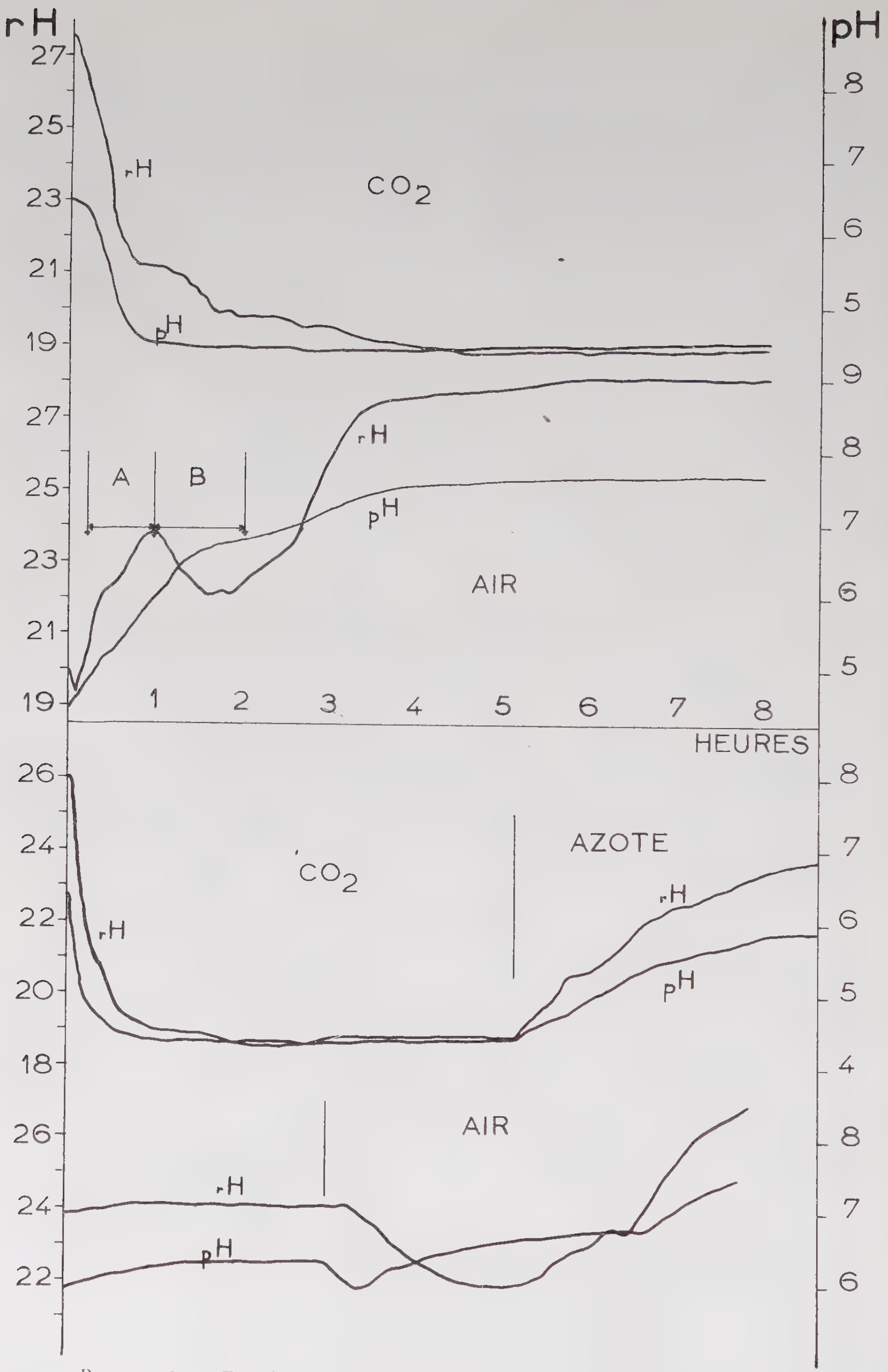

PLANCHE 6. — *Expériences de reproduction* in vitro *des conditions de l'hypolimnion.*

Partie supérieure, passage alternatif de gaz carbonique et d'air. A : zone de sursaturation en fer dissous par rapport au rH. B : précipitation visible du fer.

Partie inférieure, passage de gaz carbonique, d'azote et d'air. Dans un troisième type d'essais, il y avait passage alternatif d'azote et d'air seulement ; les courbes obtenues étaient très simples.

palier est toujours proche de 18,5 pour un rH de départ souvent supérieur à 26. Le fer est alors dosé sur un prélèvement d'eau fait à l'aide d'un dispositif prévu. Il a été trouvé 12 mg/l dans l'eau brute et seulement 5,6 mg/l sur la même eau après filtration sur membrane à pores de 1,2 microns (millipore). La pression maximale obtenue est d'environ 1 cm de mercure, donc très inférieure à celle qui peut exister au fond du lac sous 30 m d'eau, ce qui peut suffire pour expliquer les teneurs encore plus fortes rencontrées dans le lac. Nous remarquons aussi que, seule, une partie du fer est dissoute, probablement à l'état de bicarbonate ferreux, l'autre étant fixée sur des colloïdes organiques ou à l'état colloïdal libre. Les précautions nécessaires ayant été prises pour qu'il n'y ait pas de vase directement entraînée.

Dans un deuxième temps, parfois après avoir laissé reposer l'appareillage, sans barbotage de gaz, le milieu était ramené vers l'état initial en substituant, au courant de gaz carbonique, un courant d'air obtenu à l'aide d'un petit compresseur. Les mesures étaient pendant ce temps reprises régulièrement et notées de la même manière que précédemment. La courbe correspondante est aussi une courbe moyenne résultant de la confrontation d'une série d'essais. Comme dans le cas précédent, les phénomènes seront plus ou moins rapides suivant le débit imposé. Lorsque l'on a laissé un repos entre les essais, la courbe du rH débute toujours par une légère descente qui correspond à une remise en circulation de composés réducteurs qui sont contre la vase au début ; cette partie de la courbe est sans intérêt théorique. Ensuite, on enregistre toujours une remontée allant jusque vers rH 23,7, à partir de quoi s'enregistre une nouvelle descente toujours très bien marquée de deux unités rH environ. A partir de $21 < rH < 22$, l'augmentation de cette valeur se retrouve à nouveau pour monter jusqu'à un palier sensiblement égal à celui du départ dans le premier temps. Le pH était descendu avec le rH dans le premier temps, mais toujours de façon régulière ; dans le deuxième temps, il remonte presque régulièrement, sa courbe ne mettant en évidence qu'un ralentissement de sa montée pendant que le rH est redescendu. la courbe de pH ne montre jamais la redescente toujours nette du rH.

L'examen visuel montre que le liquide commence à se troubler lorsque le rH amorce sa diminution du deuxième temps, puis des flocons d'aspect pelucheux apparaissent de plus en plus nombreux ; ils grossissent et finissent par tomber sur le fond ou par s'accrocher en partie aux parois du récipient, le liquide redevient clair et c'est alors seulement que le rH remonte à nouveau. La courbe d'oxydation ne met absolument pas en évidence la valeur rH = 20,7 pour laquelle le fer en solution simple change d'état ; il existe des phénomènes comparables à ceux de la sursaturation en gaz dissous pour une température donnée.

Après un repos de 12 heures, la couche pelucheuse qui s'était formée par précipitation homogène de composés ferrugineux se dédouble ; à la base, apparaît une mince pellicule ocre jaune de 0,2 mm d'épaisseur environ, elle reste surmontée d'une couche rousse, toujours pelucheuse d'aspect, de 2 mm d'épaisseur. En dessous, la vase grise n'a pas varié d'aspect depuis le début des essais.

Si, dans un troisième temps (l'expérience a été faite après un repos de 60 heures), nous faisons subir un nouveau cycle – réduction puis oxydation – à la même eau, sans transfert, nous constatons que les courbes obtenues ne diffèrent pas, par leur aspect général, des précédentes ; sauf absence du palier, qui était plus ou moins bien marqué à rH 20,7, toutes les valeurs sont retrouvées. Mais la couche ferrugineuse

décrite, formée dans le cycle précédent, ne se redissout pas de façon visible. Il ne doit donc pas y avoir là un simple précipité d'hydroxyde ferrique pur, comme on pourrait être tenté de le croire, mais bien, plus probablement, un complexe organique où le fer est très fortement retenu. Lors de l'oxydation suivante, la courbe du rH présente toujours le même décrochement caractéristique, mais la quantité de précipité apparaissant est extrêmement réduite par rapport à celle formée au premier cycle. Donc, non seulement la couche formée est très stable vis-à-vis des conditions chimiques créées, mais il ne se produit pas non plus, à travers elle, de diffusion importante et rapide du fer ni, semble-t-il, de composés organiques solubles. Comme supposé précédemment, l'attaque bactérienne modifie probablement cette couche, mais en un temps relativement long. Nous avons vu, dans l'étude chimique, par le calcul du bilan du fer, que son apport dans les couches du fond est principalement d'origine exogène pour le lac et qu'il y a seulement enrichissement de la vase en fer. Lors de chaque stagnation, le fer apparaissant dans les couches de l'hypolimnion ne provient que pour une faible proportion de la vase sous-jacente. Il y a parfait accord entre les conclusions des dosages dans le lac et celles des expériences ci-dessus.

Il est bien connu, en chimie générale, que le fer ferrique forme des complexes organiques, en particulier avec les composés oxydrylés. La présence d'oses, en particulier, ayant déjà été signalée dans les sédiments d'eau douce, il est permis de penser que les conditions sont favorables au voisinage immédiat du sédiment lors de la réoxygénation du lac pour que la formation de complexes de ce type ait lieu.

A titre de contrôle, dans une nouvelle série d'essais, j'ai recueilli de l'eau ayant été soumise à une réduction par CO_2 sur un lit de vase comme précédemment. En fin de réduction, l'eau est chassée par le siphon à l'aide de la pression du gaz au travers d'un filtre en nylon destiné à retenir les éventuelles particules organiques figurées, et est reçue dans un grand erlenmeyer où elle est aérée par barbotage ; le précipité rouille apparaît, l'aération est poursuivie suffisamment longtemps pour que la précipitation soit bien totale. Ensuite l'eau est filtrée avec l'aide d'un vide modéré sur une membrane millipore puis on recueille, par grattage, un précipité humide contenant encore environ 50 p. 100 d'eau. Le dosage du carbone organique dans ce précipité, par la technique utilisée pour les vases, donne une teneur de 2,3 mg de carbone dans 100 mg de précipité sec. Cette teneur est limitée par la quantité de substances organiques solubilisées dans l'eau au moment de l'oxydation du fer. Il est probable, étant donné les grandes quantités de fer rencontrées à Vézins, qu'une certaine fraction de celui-ci peut quand même précipiter simplement à l'état d'hydroxyde ferrique, faute de retrouver suffisamment de substances complexantes dans l'eau.

Ces expériences nous fournissent encore une explication applicable à l'étude du rH faite dans la partie physico-chimique de l'eau. En sachant que ni les conditions exactes de température, ni celles de la pression au fond n'ont été reproduites, on peut penser cependant que les phénomènes observés diffèrent, surtout par leur intensité, de ceux qui sont rencontrés sur le fond même du lac. Les courbes de pH et de rH obtenues expérimentalement nous montrent, pour l'oxydation, que les deux valeurs ne varient pas de façon identique, ce qui est bien souvent le cas au fond du lac (voir en particulier le tableau 9 : variation de t^o, pH et rH en 1962). Nous compre-

nons aussi que la courbe du rH puisse présenter, au voisinage du fond, un décrochement plus ou moins important et que du fer, probablement ferreux, puisse être trouvé en grande quantité à un rH supérieur à 20,7, ceci en raison de la sursaturation mise en évidence dans la courbe d'oxydation.

Afin de vérifier que l'importance du gaz carbonique dans le cycle envisagé n'a pas été surestimée, on utilise le même montage dans une autre série d'expériences, mais avec un premier barbotage avec de l'azote au lieu et place du gaz carbonique. L'azote est chimiquement inerte dans les conditions des essais et ne doit donc agir qu'en chassant l'oxygène qui est présent dans l'eau au début. Il semble, *à priori*, que l'on devrait ainsi pouvoir obtenir aussi des conditions fortement réductrices. L'examen des courbes montre qu'il n'en est rien ; si on enregistre bien un petit abaissement du rH au début, il reste bien au-dessus de rH 20,7 et remonte même ensuite progressivement. Les conditions produites sont, finalement, plutôt des conditions oxydantes que réductrices, le pH remonte lui aussi et, d'acide, devient alcalin.

Après un repos de 12 heures, rH et pH sont redescendus légèrement, l'aération amène à nouveau la montée de leurs valeurs : pour le pH, moins alcalin que l'azote ne l'avait fait et pour le rH, très légèrement plus oxydant seulement. Il est possible de repérer, sur la courbe de rH, une très petite inflexion rappelant la diminution observée après l'utilisation du CO_2 ; elle est si faible qu'il est tentant de l'attribuer à des traces de CO_2 présentes dans l'eau au début de l'expérience. Aucune précipitation n'est visible.

Ces derniers essais confirment que le choix du gaz carbonique est très bon pour reproduire les conditions de Vézins et que le rôle attribué à ce gaz en dissolution dans les eaux du lac est très proche si ce n'est parfaitement conforme à la réalité.

De cette dernière série d'essais en est découlée une suivante dans laquelle l'azote a été utilisé au contraire pour chasser le gaz carbonique. On procède, en premier, à une réduction par CO_2 qui est poursuivie trois heures après l'établissement du palier de l'état réduit vers rH 18,5. Ensuite, c'est un courant d'azote qui est dirigé dans le montage ; on observe alors simplement une remontée régulière des valeurs, pour le rH jusqu'à 24 et pour le pH jusqu'à 6,3, sans décrochement ni précipitation apparente. Les conditions semblent se stabiliser à ce stade. Si nous substituons alors un courant d'air comprimé au courant d'azote, nous trouvons une descente immédiate du pH en dessous de 6 tandis que le rH amorce d'abord une légère montée avant de descendre à son tour de deux unités environ. Pendant que la précipitation du fer apparaît pour le rH tout se passe comme s'il n'y avait eu aucune action de l'azote, le fer reste en sursaturation et l'oxygénation seule entraîne sa précipitation. L'action de l'azote ayant été poussée jusqu'à une durée de 24 heures, on peut considérer alors qu'il ne doit plus rester de CO_2 en solution ; donc le départ de ce gaz n'est pas suffisant pour précipiter le fer, ce qui conduit à se demander dans quelle proportion celui-ci est encore à l'état de bicarbonate et si, dès le début de la réduction, il n'y a pas évolution du fer vers des complexes organiques, ceci bien qu'il soit manifestement ferreux. On sait, cependant, que dans la formation de l'hydrate ferrique à partir du bicarbonate ferreux, l'oxygène libre est considéré comme indispensable. Si, à la suite du cycle précédent, nous essayons de faire subir un deuxième cycle identique à notre préparation sans renouveler ni l'eau ni la vase, les phénomènes apparaissent plus complexes, alors que dans un cycle simple, avec azote, il n'y avait qu'une dimi-

nution de leur intensité. Tout se passe comme si une substance, indispensable au déroulement du cycle, avait été bloquée dans le premier essai.

Toute une nouvelle série de dosages et d'essais serait donc encore à entreprendre pour mieux expliquer ce problème du cycle du fer dans les eaux douces.

d) *Observations écologiques*

Le montage a permis aussi une autre série d'observations qui sont d'écologie. La vase utilisée, prise à un niveau moyen (pour la prise d'avril 1963), était oxydée en surface et renfermait quelques Oligochètes de petite taille, 15 mm de long, qui ont été déterminés comme appartenant au genre *Tubifex*, leur état de jeunesse ne permettant pas de reconnaître leur espèce avec certitude. Dans le laboratoire, la nuit seulement, ces animaux viennent creuser des galeries contre la paroi en verre du récipient qui contient la vase, ils semblent donc fuir la lumière. L'eau ayant été réduite puis oxydée suivant les essais donnés précédemment, les *Tubifex* construisent des galeries à travers la couche ferrugineuse déposée et détruisent sa disposition assez rapidement. Les orifices supérieurs des galeries sont entourés des déjections formées de petits cyclindres gris qui s'amoncellent, la construction qui n'a aussi lieu que la nuit est rapide. Lorsqu'une réduction est faite sur la même préparation ayant déjà subi un cycle et où les animaux ont travaillé, on constate que la construction des « terriers », en surface de la vase, est interrompue pendant tout le temps où les conditions sont maintenues réductrices dans l'eau même en l'absence de lumière, elles reprennent avec le retour de l'oxygène. En supposant constante la vitesse de travail de ces animaux, on peut estimer que la stratification créée artificiellement peut être détruite, sur 500 ml de vase dont la surface est un cercle de 10 cm de diamètre, en moins de 14 jours de conditions d'oxygénation suffisantes dans l'eau recouvrante. La vase était tamisée soigneusement en fin d'expérience pour le comptage des organismes, on trouve que ceci est l'œuvre de deux *Tubifex* seulement, de la taille donnée plus haut. La présence de ces animaux suffit donc pour expliquer la disparition des varves, au-dessus de 12 m, signalée par A. JOURNAUX ([102] 1953) dans le lac de Vézins.

Ces observations de fonds azoiques, permettant la conservation des varves, présentent un grand intérêt du point de vue géologique. On retrouve, en effet, des séries très importantes de roches déposées dans de telles conditions alors que ces fonds sont, pour le moins, très rares dans le milieu marin actuel où la présence d'organismes perturbateurs des sédiments semble la règle. J'avais moi-même déjà décrit dans mon *D. E. S.*, en 1956, une roche varvée en indiquant que : « L'extrême finesse des lits se comprend mieux si on fait correspondre ce faciès à un dépôt lacustre ou lagunaire qu'à un dépôt marin » (3ᵉ partie : « Le Briovérien environnant » ; dans le texte complet p. 24).

e) *Conclusion*

Les expériences précédentes sont à rapprocher de deux travaux antérieurs. A. RIVIÈRE a étudié les conditions physico-chimiques de la sédimentation ferrugineuse en milieu marin (A. RIVIÈRE [149] 1942). Il a constaté que : « Les sels ferreux sont solubles dans l'eau de mer, à des concentrations de plusieurs grammes par litre

et que ces solutions sont stables à pH assez bas et à rH peu relevé (assez réducteur). Par aération (barbotage), les sels ferreux s'oxydent partiellement en sels ferriques, lesquels ont tendance à s'hydrolyser en donnant de l'hydrate ferrique qui précipite, cependant que l'acide libéré abaisse le pH. Dans ces conditions, il peut rester en solution une quantité de fer assez importante. En présence d'un sédiment calcaire préexistant, l'acide est neutralisé et la précipitation du fer en hydrate ferrique devient totale. » A. Rivière a noté aussi qu'en présence de carbonate de chaux, les sels ferreux dissous dans l'eau de mer avaient tendance à précipiter, même en milieu réducteur.

A Vézins, le milieu étudié est pauvre en calcaire et cependant le pH ne s'abaisse pas pendant l'aération et la précipitation apparaît totale. Il faut donc penser que l'acide carbonique libéré est déplacé par les acides organiques présents, acides humiques en particulier, et est entraîné aussitôt par le courant gazeux tandis que les mêmes acides organiques entrent en combinaison complexe avec l'hydrate ferrique formé.

Les essais de H. Mortimer ([129] 1941-42) ont donné lieu à des expériences qui sont à rapprocher de ce travail, mais Mortimer laissait ses bacs évoluer d'eux-mêmes et n'a pas étudié un retour de l'état totalement réduit à l'état oxydé ; d'autre part, ses mesures portaient obligatoirement sur de nombreux jours.

Remarquons que les travaux les plus nombreux sur la limnologie du fer cherchaient plutôt à prouver l'existence de complexes organiques permettant au fer de rester en solution à un potentiel d'oxydo-réduction relativement élevé, ceci afin d'expliquer l'anomalie de la présence de fer dans des eaux oxygénées et de pH peu acide. L'existence de tels complexes peut être considérée, et est admise par la plupart des chercheurs, comme étant démontrée, mais leur nature exacte ne semble pas encore parfaitement élucidée. Il est connu, en chimie, que le fer peut former des complexes assez solubles dans l'eau, en présence de composés oxydrylés en particulier ; il doit pouvoir en former aussi avec certains acides organiques, tels que des acides aminés, trouvés dans la vase et dont l'existence a aussi été démontrée parmi les acides humiques des sols. Je pense avoir montré qu'il se formait aussi des complexes ferrugineux organiques dans la précipitation du fer et avoir trouvé une voie pour poursuivre l'étude de la chimie du fer dans l'eau. Les connaissances qui peuvent en découler étant du plus grand intérêt pour la chimie des eaux, en général, et de celles qui sont pauvres en calcaire, en particulier. Les applications pratiques sont évidentes.

Notons, d'autre part, que nous avons mis en évidence, dans les varves, deux types de couches. Au premier type appartiennent les couches à Diatomées ; elles sont formées par des dépôts dont les matériaux proviennent soit de toute la hauteur du lac, soit de l'epilimnion seul. Le cycle thermique n'a que peu d'action sur elles sauf indirectement, dans leur préservation, en éloignant les animaux susceptibles de les perturber. Ces couches peuvent se former dans la vase, depuis une très faible distance de la surface jusqu'aux plus grands fonds.

Nous prendrons, comme exemple du deuxième type, les couches noires craquelées, à composants organiques dominants. Nous avons vu leur origine ; il en résulte qu'elles ne peuvent se former que les années où un thermocline s'est bien établi, et seulement en-dessous de ce thermocline. Nous pouvons donner, aux varves renfermant des couches de ce deuxième type, le nom de varves hypolimnétiques ; ces

dernières sont susceptibles de présenter un intérêt pratique dans l'examen de carottes varvées prélevées dans des lacs anciens, lorsqu'on se propose de les utiliser pour retracer l'histoire du lac étudié.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'étude thermique a montré que le lac de Vézins est un lac tiède à une seule période de circulation, en hiver (lac *warm monomictic* des auteurs de langue anglaise). Le lac se stratifie thermiquement en été avec un thermocline qui s'établit à proximité du barrage, juste en dessous du niveau des prises d'eau. Cette cote est très proche de celle à laquelle ce thermocline s'établirait, si le lac était un lac naturel à effluent superficiel. J'ai pu mettre en évidence que les courbes de température traduisent encore, après un cycle annuel complet les perturbations amenées par un hiver particulièrement rigoureux.

En conséquence de la stagnation estivale, l'oxygène disparaît totalement sur le fond ; j'ai pu calculer le déficit relatif en oxygène dans l'hypolimnion pour 1961 : il a été de 0,074 3 mg/l/jour. La consommation de l'oxygène a pu aussi être suivie par le calcul du pourcentage de la saturation à chaque dosage.

L'alcalinité est toujours faible, 5 à 6 degrés alcalimétriques français, sauf sur le fond, pendant la stagnation, où la quantité de carbonates augmente considérablement. La suite de l'étude a montré que les carbonates en question sont alors principalement représentés par le carbonate ferreux : $Fe(HCO_3)_2$. Sous cette forme, a pu être trouvée la teneur particulièrement élevée de 37,2 mg/l de fer, en octobre 1963, et le lac se comporte comme un « piège à fer ». J'ai pu calculer qu'il avait retenu 4,6 tonnes de fer dans l'année 1961. Ce fer est apporté par la Sélune et surtout par les eaux de ruissellement entraînant les produits de la décomposition des roches encaissantes, principalement des limons quaternaires, la zone littorale fréquemment émergée et immergée paraissant offrir la libération de fer la plus active.

Le métabolisme du fer dans le lac de Vézins est le point qui revêt la plus grande importance chimique. Il s'explique surtout par la pauvreté des eaux en calcium, le soufre n'entre que pour une quantité faible dans ce cycle. Ce type d'évolution chimique est généralisable à d'autres lacs présentant les mêmes caractères de pauvreté en calcium et de richesse en fer.

Le manganèse est également présent en grande quantité sur le fond pendant la stagnation. Le rapport Fe/Mn a atteint 35,6 en septembre 1963 en ce point et a été de 24,1 en octobre, au moment de la plus forte teneur : 1,54 mg/l en manganèse, ce rapport est descendu à 21,5 en novembre, le fer précipitant le plus vite.

La Sélune apporte une certaine quantité d'azote sous la forme d'ammoniac qui apparaît en relation directe avec la pollution au niveau de la ville de Saint-Hilaire-du-Harcouët. Le lac épure l'eau de ce point de vue. La variation de l'azote nitrique ne présente pas de particularités autres que les minimums, de connaissance classique, liés aux variations du phytoplancton.

Le phosphore est très peu abondant. C'est le cas général dans les eaux douces où cette substance a souvent été considérée comme le facteur limitant la production primaire. Ses variations sont irrégulières mais ceci n'est pas une particularité propre à Vézins, elle semble en relation avec la faible teneur. Les variations de l'oxydabilité

traduisent aussi la pollution de la Sélune à son arrivée dans le lac. L'auto-épuration est bien nette le long du lac, mais elle semble annulée en partie dans l'émissaire Une relation entre l'oxydabilité et le cycle du fer sur le fond du lac a pu être mise en évidence et m'a permis d'introduire une correction à l'oxydabilité trouvée, qui s'impose dans ce cas si l'on considère toujours l'oxydabilité comme une représentation de la teneur en matières organiques.

La chimie du chlore dans les eaux douces est très imparfaitement connue ; à Vézins, le chlore augmente sur les zones du lac les moins profondes en fin d'année, ce qui recoupe les observations d'autres auteurs faites à la suite d'études sur les étangs. A cette même époque, la zone profonde semble capter et retenir l'excès de chlore qu'elle reçoit. Le sodium présente une teneur assez peu variable qui augmente un peu en fin d'année comme celle du chlore ; il est possible, dans ce cas particulier, d'invoquer un apport de chlorure de sodium à partir de la mer proche, la dilution dans la zone profonde du lac effaçant le phénomène.

Le potassium, plus utilisé par le phytoplancton, montre une plus grande variabilité en rapport direct avec ce phénomène. Inversement, la mort du plancton libère du potassium, ce qui amène un enrichissement en potassium sur le fond pendant la stagnation. La teneur en calcium est faible mais normale pour la situation du lac. Le calcium augmente en juillet-août en surface et sur le fond pendant la stagnation. Le magnésium présente des variations proches de celles du calcium, le maximum est trouvé juste après celui du calcium, en septembre ; comme pour le fer et le manganèse, ceci est dû très probablement au fait que les deux corps ne précipitent pas en même temps, mais juste l'un après l'autre.

Le soufre n'est pas très abondant à Vézins ; des sulfures n'ont été mis en évidence sur le fond en quantités appréciables que pendant la stagnation.

Le rapport Mg/Ca diminue avec l'augmentation de la teneur en calcium ; K/Na avec l'augmentation du sodium. Ces résultats, déjà montrés pour des eaux différentes de celles de Vézins, ont été confirmés ici. La même variation, diminution du rapport, a été trouvée pour Na/Cl lorsque le chlore augmentait, ce qui se produit lors des précipitations les plus importantes. Dans les eaux de Vézins, les alcalins dominent sur les alcalino-terreux, ce qui est l'inverse du cas général.

Le pH montre toujours une alcalinisation importante des eaux de surface au moment des plus fortes croissances de phytoplancton et toujours une alcalinisation au contact de la vase par rapport à l'eau qui la recouvre immédiatement. Lors de la stagnation, il y a toujours une acidification au passage de l'épilimnion dans l'hypolimnion. Ces résultats ont été obtenus par la mesure du pH, mètre par mètre.

Le rH, mesuré aussi mètre par mètre, peut atteindre 36,3 pour les eaux de surface particulièrement bien aérées. En période de circulation, il n'est pas anormal de trouver un rH augmentant avec la profondeur. Lorsque le thermocline existe, il est toujours marqué par une augmentation du gradient de la courbe à son passage. Les variations du rH moyen dans l'hypolimnion semblent bien se reproduire d'une année sur l'autre ; forte baisse du rH lors de l'établissement de la stagnation ; le rH remonte ensuite lorsque les conditions sont bien établies. La zone riche en fer se traduit toujours sur les courbes par une descente brusque du rH, mais une valeur définie caractéristique n'a pas été trouvée.

Les grandes variations du plancton, végétal principalement, ont été reconnues, ainsi que les espèces susceptibles de former des dominantes et qui caractérisent

ce lac : *Fragilaria crotonensis*, *Staurastrum sebaldii* et *S. planctonicum*, *Mallomonas fastigata*, *Asterionella formosa* et *Ceratium hirundinella* avec deux formes alternant dans l'année. Au total, 140 algues différentes ont été reconnues. La bactérie *Sphaerotilus natans*, caractéristique des pollutions par matières organiques, a aussi été trouvée fréquemment, surtout dans l'amont du lac. Il y a pratiquement un plancton d'étang pollué à l'amont du lac et un plancton de grand lac eutrophe à proximité du barrage : le passage est progressif de l'amont vers l'aval.

Le zooplancton est caractérisé par des Rotifères et des Cladocères à proximité du barrage, et par des Protozoaires en amont. Les Rotifères ont été étudiés surtout par J. HIRT, j'ai pu vérifier les principaux résultats. *Keratella cochlearis* est le zooplanctonte le plus communément rencontré quelle que soit la période de l'année ; on trouve aussi, souvent, *Kellicottia longispina*, mais seulement dans l'aval, tandis que la première espèce est répandue dans tout le lac. Parmi les Cladocères : *Bosmina*, représentée par ses deux espèces qui alternent, et *Daphnia longispina* (avec des variétés ou des espèces proches, suivant la classification adoptée) sont les plus abondants et fréquents. Des Copépodes peuvent aussi se multiplier, pendant un temps court, si la température reste quelques temps assez élevée.

Une larve de Chironomide : *Limnochironomus* sp. est caractéristique du benthos à proximité du rivage, tandis que l'on trouve des *Tubifex* dans la vase jusqu'au niveau du thermocline. La liste des invertébrés du lac a été amenée à près de 95 animaux différents.

Une seule plante supérieure immergée : *Elodea densa*, qui résulte d'une introduction accidentelle, s'est maintenue quelques années et peut présenter un intérêt pour l'aménagement piscicole. Son utilisation peut être à recommander puisqu'il semble qu'elle puisse être contrôlée par modification du niveau de l'eau de quelques mètres.

En définitive, seule la production planctonique apparaît élevée dans le lac de Vézins.

Dans l'étude des sédiments, j'ai pu donner une explication de la formation des varves qui s'accorde avec la chimie du lac, les successions du plancton et une série d'expériences montées spécialement. J'ai mis en évidence l'existence, simultanée ici, de deux types de lits dans les varves. Certains lits peuvent se former dès la surface et proviennent de restes d'organismes ou d'apports détritiques. Ceux du deuxième type ne peuvent exister qu'en dessous d'un thermocline ; ils seront surtout mis en évidence par des substances organiques apparues en milieu anaérobie. L'étude chimique a demandé la mise au point d'analyses chimiques délicates qui peuvent être appliquées à d'autres vases ; elles concernent en particulier l'azote total, le fer, le manganèse, l'activité déshydrogénante. J'ai établi et proposé une méthode rapide de mesure de la capacité d'échange. L'étude biochimique en particulier, a été entreprise par l'utilisation de la chromatographie et de l'ionophorèse pour les acides aminés, les acides gras et les glucides. Mon intention est de poursuivre ces recherches qui, associées à l'étude microbiologique des mêmes vases, permettront d'approfondir la connaissance de leur évolution dans le temps et de toucher le problème des échanges entre la vase et l'eau.

Enfin, dans une série d'expériences de laboratoire en milieu contrôlé, j'ai pu reproduire le cycle du fer du fond du lac, préciser certains de ses rapports avec le pH et surtout le rH, et mettre en évidence un phénomène de sursaturation par rapport à ce rH. Ceci explique que les mesures relevées sur le terrain n'apparaissent

pas toujours en accord parfait avec les valeurs théoriques, pour la transformation de la forme réduite du fer dans la forme oxydée et inversement. Mon intention est, également, de poursuivre ces expériences, en perfectionnant le montage et l'étude chimique parallèle. Ces recherches sont de valeur générale en hydrobiologie et peuvent être appliquées à beaucoup d'autres lacs pour la compréhension des phénomènes qui y ont lieu.

Ce travail a, donc, apporté des connaissances nouvelles pour le cas particulier du lac de Vézins. Beaucoup peuvent être généralisées à d'autres lacs de barrage ou naturels. Il m'a permis, d'autre part, de mettre au point des méthodes de travail applicables à l'ensemble de la limnologie. L'étude entreprise, et à poursuivre, sur la biochimie et le rH en particulier, donne déjà des renseignements nouveaux en limnologie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Aleev B. S., Mudretsova K. A., 1937. The role of phytoplancton in the dynamics of nitrous substances in a florescent reservoir. *Microbiologya*, 6, **3**, 329-338.T raduction anglaise de G. Belkov, (Ottawa, 1963).

[2] Allorge P., Lefèvre M., 1930. Algues de Sologne. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, **77**, 122-150.

[3] Allorge V. P., 1930. Matériaux pour la flore des algues d'eau douce de la péninsule ibérique. I. Hétérocontées, Euchlorophycées et Conjuguées de Galicie. *Rev. Algo.*, **5**, 1-56.

[4] American public health Association, 1955. *Standards methods for the examination of water and sewage*. 1 vol. 522 p.

[5] André E., 1912. *Catalogue des invertébrés de la Suisse*, VI. Infusoires. 1 vol. 228 p.

[6] Audubert R., de Mende S., 1957. *Les principes de l'électrophorèse*. 1 vol. 201 p.

[7] Bertrand H., 1954. Les insectes aquatiques d'Europe. *Encyclopédie entomologique*, XXX et XXXI, 2 vol. 556 et 547 p.

[8] Bigeard E., 1934. Les *Pediastrum* d'Europe. Étude biologique et systématique. *Rev. Algo.* **7**, 1-94, 327-418.

[9] Birge E. A., 1916. The work of the wind in warming a lake. *Trans. Wis. Acad. Sci., Arts Lett.*, **18**, 2, 341.

[10] Bischop C. T., Anet E. F. L. J., Gorham P. R., 1959. Isolation and identification of the fast-death factor in *Microcystis aeruginosa*. *Canad. J. Bioch. phys.*, **37**.

[11] Bodenheimer F. S., 1955. Précis d'écologie animale. Trad. J. Théodorités. *Bibli. Scient. Payot, Paris*, 1 vol., 315 p.

[12] Bosset E., 1962. La lac de Joux (résumé de Thèse). *Schweiz. Z. Hydrobiologie*, **24**, 1, 90-151.

[13] Botincev K. K., 1955. Les modes de migration de la silice dans le lac Baïkal. *Trudy vsesojuszn. Gdrobiol. Obshch, S. S. S. R.*, **6**, 70-79.

[14] Bourcart J., 1941. Essai d'une classification raisonnée des matériaux meubles. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5, **11**, 117-153.

[15] Bourcart J., 1941. Essai de définition des vases des eaux douces. *C. R. Acad. Sci.*, **212**, 448-450.

[16] Bourcart J., 1941. Sur les boues et limons déposés par les cours d'eau. *C. R. Acad. Sci.*, **212**, 651-653.

[17] Bourcart J., 1942. La vase, milieu biologique. *C. R. Som. Soc. Biogéo.*, **19**, 1-5.

[18] Bourcart J Francis-Bœuf C., 1942. La vase. *Actual. Scient. Ind.*, **927**, 1 vol. 67 p.

[19] Bourrelly P., 1947. Algues rares et nouvelles des mares de la forêt de Fontainebleau. *Rev. Gén. Bot.*, **54**, 643.

[20] Bourrelly P., 1951. Volvocales rares ou nouvelles. *Hydrobiologia*, **3**, (3), 251-281.

[21] Bourrelly P., 1951. Xanthophycées rares ou nouvelles. *Bull. Mus. nat. Hist. nat.*, **23**, (6), 666-672.

[22] Bourrelly P., 1951. Notes sur quelques Chlorococcales. *Bull. Mus. nat. Hist. nat.*, **23**, (6), 673-684.

[23] Bourrelly P., 1958. Recherches sur les Chrysophycées. Morphologie. Phylogénie. Systématique. (Thèse de doctorat). *Rev. Algo.*, Mémoire **1**, 1 vol. 412 p.

[24] Bourrelly P., 1958. Initiation pratique à la systématique des algues d'eau douce. *Bull. Micro. App.*, 2, **8**, 1, 21-32, 2, **8**, 2, 49-60.

[25] Bourrelly P., 1961. Algues d'eau douce de la Côte-d'Ivoire. *Bull. I. F. A. N.*, XXIII, A, 2.

[26] Brook A. J., 1959. The published figures of the Desmid *Staurastrum paradoxum*. *Rev. Algo.*, **4**, 4.

[27] BRAJNIKOV B., FRANCIS-BŒUF C., ROMANOVSKY V., 1943. Techniques d'étude des sédiments et des eaux qui leurs sont associées. *Actual. Scient. Ind.*, **952**, 1 vol., 110 p.

[28] BUYDENS R., LEDENT R., 1957. La détermination de l'oxydabilité des eaux. *Bull. C. B. E. D. E.*. **38**, IV, 238-241.

[29] CHANDLER D. C., 1940. Limnological studies of Western Lake Eriel. I. Plankton and certain chemical data of the Bass Island Region from September 1938 to November 1939. *Ohio J. Sci.*, **40**, (6), 291-3336.

[30] CHANDLER D. C., WEEKS O. B., 1945. Limnological studies of Western Lake Erie. V. Relation of Limnological and meteorological conditions to production of phytoplancton. *Ecol. Monogr.*, **15**, 435-457.

[31] CHARLOT G., BÉZIERS D., 1955. *Analyse qualitative minérale*, 3e éd., 1 vol., 823 p.

[32] CHARLOT G., 1961. *Dosages colorimétriques des éléments minéraux*, 2e éd., 1 vol., 379 p.

[33] CHARLOT G., 1963. *L'analyse qualitative et les réactions en solution.* 1 vol., 442 p.

[34] CHODAT R., 1909. *Étude critique et expérimentale sur le polymorphisme des algues.* 1 vol., 56 p.

[35] CHODAT R., 1926. *Scenedesmus.* Étude de génétique, de systématique expérimentale et d'hydrobiologie. *Schweiz. Z. Hydrologie.*, **3**, 71-258.

[36] CHU S. P., 1943. The influence of the composition of the medium on the growth of planktonic alga. II The influence of inorganic nitrogen and phosphate phosphorus. *J. Ecol.*, **31**, 109-148.

[37] COLLET L. W., 1925. *Les lacs*, 1 vol, 320 p.

[38] COMERE J., 1906. Observations sur la périodicité et le développement de la flore algologique de la région toulousaine. *Bull. Soc. Bot.*, **53**, 390-407.

[39] COMERE J., 1913. De l'action du milieu considéré dans ses rapports avec la distribution générale des algues d'eau douce. *Bull. Soc. Bot.*, **60**, (25), 1-96.

[40] COWELL B. C., 1960. A quantitative study of the winter plankton of Urschel's quarry. *Ohio J. Sci*,. **60**, 3, 183-191.

[41] CZURDA V., 1932. Zygnemales. *Die Süsswasser Flora Mitteleuropa*, **9**, 1 vol.

[42] DAS S. M., 1957. Étude quantitative du plancton d'eau douce dans le lac piscicole de Lucknov, Inde, *Zool. zh., S. S. S. R.*, **36**, 3, 328-336.

[43] DANGEARD P. A., 1938. Mémoire sur la famille des Péridiniens. *Le Botaniste.*, **29**, 3-182.

[44] DANGEARD L., 1953. Les vases lacustres de la Sélune (Manche). *C. R. som. Soc. Géo. Fr.*, **12**, 226-227.

[45] DANGEARD L., 1951. La Normandie. *Bibl. Scient. Ind.*, **1140**, 1 vol., 241 p.

[46] DÉRIBÉRÉ M., 1949. *Les applications industrielles du rH et le potentiel rédox.*, 1 vol., 160 p.

[47] DESPAX R., 1951. Plécoptères. *Faune de France*, **55**, 1 vol.

[48] DESROCHES R., FREDETTE V., 1960 Étude d'une population de bactéries réductrices du soufre. *Canad. J. Microbiol.*, **6**. 3, 349-354.

[49] DINGLEY P., 1920. The collection and preparation of Diatoms. *Microscope Record Watson.*, **18**, 16-18.

[50] DROUET F., 1939. The planktonic freshwater species of *Microcystis Field Mus. Bot. Ser.*, **20**, 1 vol.

[51] DUCHAUFOUR Ph., 1960. *Précis de pédologie.*, 1 vol., 438 p.

[52] DUSI H., 1940. Culture bactériologiquement pure et nutrition autotrophe d'*Eudorina elegans*. Rôle du fer dans la formation des colonies. *Ann. Inst. Past.*, **64**, (4), 340-343.

[53] DUSSART B. H., 1953. *Température et mouvement des eaux dans les lacs.* Thèse Paris. (Exemplaire original polycopié).

[54] DUSSART B. H., 1963. Les grands lacs d'Europe occidentale. *Ann. Biol.*, **4**, 2, 499-572.

[55] EDMONSON W. T., 1959. Fresh-water biology de WARD et WHIPPLE. 2e éd., 1 vol., 1248 p.

[56] FEUILLADE J., 1962. Une plante aquatique nouvelle pour la France : *Elodea densa. Bull. Soc. Lin. Norm.*, (10), **2**, 47-51.

[57] FEUILLADE J., 1962. Complément à l'étude d'*Elodea densa.*. *Bull. Soc. Lin. Norm.*, (10), **2**, 185-188.

[58] FEUILLADE M., 1965. Les variations verticales du phytoplancton du lac de Vézins en 1963. (En cours de publication).

[59] FISH G. R., 1956. Chemical factors limiting growth of phytoplankton in lake Victoria. *East Afr. Agric. J.*, XXI, 3.

[60] FLINT E. A., 1950. An investigation of the distribution in time and space of the alga. *Hydrobiologia*, **2**, (3), 217-240.

[61] FRANCIS-BŒUF C., 1941. Le rapport de l'azote à la matière organique totale dans les vases de l'estuaire de la Penzé. *C. R. Som. Soc. Géol.*, **14**, 110-111.

[62] FRANCIS-BŒUF C., 1943). Sur la constitution des sédiments vaseux de l'estuaire de la Loire. *Bull. Inst. Océan.*, **839**, 1-8.

[63] FRANCIS-BŒUF C., 1947. Recherche sur le milieu fluvio-marin et les dépôts d'estuaires. *Ann. Inst. Océan. N. S.*, **23**, 149-344. (Bibliographie très importante).

[64] FRANTSEV A. V., 1932. Experiments in estimating the hydrobiological productivity of the Moscow river water. *Microbiologya*, **1**, (2), 112-130. Trad. de G. Belkov, NRC TT-938, Ottawa 1961.

[65] FRÉMY P., 1937. Une pêche de plancton dans le lac des Biards (Manche) *Bull. Soc. Lin. Norm.*, (8), **10**, 12.

[66] FRÉMY P., MESLIN R., 1947. Un plancton à *Staurastrum paradoxum* (MEYEN) observé en Normandie. *Bull. Soc. Lin. Norm.*, (9), **5**, 153-163.

[67] FRITSH F. E., 1931. Some aspects of the ecology of fresh-water alga. *J. Ecol.*, **19**, 233-272.

[68] GAYRAL P., 1954. Recherches phytolimnologiques au Maroc. *Trav. Inst. Scient. chérifien. Bot.*, **4**. 1 vol. 306 p.

[69] GEITLER L., PASCHER A., 1925. Cyanophyceae, Cyanochloridinae, Chlorobacteriaceae. *Süsswasser Flora Deutsch. Oster.und der Schweiz*, **12**, 1 vol.

[70] GZITLER L., 1923. Cyanophyceae. *Rabenh. Krypt. Flora*, **14**, 1 vol.

[71] GEOGE M. G., 1962. Occurence of a permanent algal bloom in a fish tank at Delhi, with special reference to factors responsible for its production. *Proc. indian Acad. Sci., B*, **56**, 6, 354-362.

[72] GERMAIN L., 1931. Mollusques terrestres et fluviatiles. *Faune de France*, **22**, 2 vol.

[73] GESSNER F., 1948. The vertical distribution of phytoplankton and the thermocline. *Ecology*, **29** (3), 286-289.

[74] GOETGHEBUER M., 1923. Diptères Chironomidae IV (Orthocladiinae, Corynoneurinae, Clunioninae, Diamesinae). *Faune de France*, **23**, 1 vol.

[75] GOETGHEBUER M., 1927. Diptères (Nématocères), Chironomidae, Tanipodinae. *Faune de France*, **15**, 1 vol.

[76] GOETGHEBUER M., 1928. Diptères (Nématocères), Chironomidae III, Chironomariae. *Faune de France*, **18**, 1 vol.

[77] GORHAM P. R., 1962. Laboratory studies on the toxins produced by waterblooms of blue-green algae; *Amer. J. Public Health* (manuscrit à paraître dans).

[78] GORHAM P. R., GORHAM T., 1960. Toxic waterblooms of blue green algae. *Canad. Vet. J.*, **1**, 6.

[79] GRANT G. A., HUGHES E. I., 1953. Development of toxicity in bluegreen algae. *Nat. Res. Council.*, **3**, 103.

[80] GUSEVA K. A., 1937. The hydrobiology and microbiology of the Ucha reservoir of the Moscow-Volga canal. III. *Microbiologija*, **6**, (4), 449-464. Trad. Angl. G. Belkov, NRC TT-878, Ottawa 1960.

[81] GUSEVA K. A., 1938. Hydrobiological productivity and the forecast of bloom on water reservoirs. *Microbiologija*, **7**, (3), 303-314. Trad. Angl. G. Belkov., NRC TT-879, Ottawa 1960.

[82] GUSEVA K. A., 1939. Bloom on the Ucha reservoir. *Bull. Moskov. Olsch. Ispytat. Prirody. Otdel. Biol.*, **48**, (4), 30-32. Trad. angl. G. Belkov, NRC TT-879. Ottawa 1960.

[83] GUSEVA K. A., 1941. Bloom on the Ucha reservoir. *Trudy zool. Inst. Akad. Nauk. S. S. S. R.*, **7**, 89-121. Trad. angl. G. Belkov NRC TT-939. Ottawa 1961.

[84] GUSEVA K. A., 1952. Water Bloom, its causes, prediction and control. *Tr. Vses. Gidrobiol. Olshchestva Akad. Nauk. S. S. S. R.*, **4**, 3-92. Trad. Angl. V. Topchy, NRC TT-1068, Ottawa 1962.

[85] GUSEVA K. A., 1955. Phytoplankton of the Rybinsk reservoir. *Tr. Biol. St. « Borok » Akad. Nauk. S. S. S. R. Inst. Biol. Vodokhranilishch*, **5**, 23. Trad. angl. V. Topchy NRC TT-1043. Ottawa 1962.

[86] HEERING W., 1915. Chlorophyceae III. *Süsswasser Flora Deutsch Oster. und der Schweiz.*, **6**, 1 vol.

[87] HEERING W., 1921. Chlorophyceae IV. *Süsswasser Flora Deutsch. Öster. und der Schweiz.*, **7**, 1 vol.

[88] HIRT J., 1962. *Le microplancton du lac des Biards.*, D. E. S. Caen. Exemplaire original polycopié, 1 vol

[89] HUBER-PESTALOZZI G., 1938. Das phytoplankton des Süsswassers. Blaualgen, Bacterien, Pilze. *Die Binnengewasser*, **16**, 1, 1 vol.

[90] HUBER-PESYALOZZI G., 1941. Das phytoplankton des Süsswassers. Chrysophyceen, Farbloses Flagellaten, Heterokonten. *Die Binnengewasser*, **16**, 2, 2, 1 vol.

[91] HUBER-PESTALOZZI G., 1942. Das phytoplankton des Süsswassers. Diatomeen. *Die Binnengewasser*, **16**, 2, 2, 1 vol.

[92] HUBER-PESTALOZZI G., 1950. Das Phytoplankton des Süsswassers. Cryptophyceen, Chloromonadineen Peridineen. *Die Binnengewasser*, **16**, 3, 1 vol.

[93] HUBER-PESTALOZZI G., 1955. Das phytoplankton des Süsswassers. Euglenophyceen. *Die Binnengewasser.*, **16**, 4.

[94] HUBER-PESTALOZZI G., 1961. Das Phytoplankton des Süsswassers. Chlorophyceae (Grünalgen), Ordnung Volvocales. *Die Binnengewasser.*, **16**, 5.

[95] HUGHES E. O., GORHAM P. R., ZEHNDER A., 1958. Toxicity of an unialgal culture of *Microcystis aeruginosa*. *Canad. J. Microbiol.*, **4**.

[96] HUGHES J. C., LUND J. W. G., 1962. The rate of growth of *Asterionella formosa* Hassall. in relation to its ecology. *Archiv Mikrobiol. Dtsch.*, **4 2**, 2, 11-129.

[97] HUSTED F. 1930. Die Kieselalgen Deutsch., Öster. und der Schweiz. *Rabenh Krypt. Flora.*, **2**, 1, 5, 1 vol.

[98] HUSTEDT F., 1940. Bacillariphyta. *Die Süsswasser Flora Mitteleuropa.*, **10**, 1 vol.

[99] HUTCHINSON J. E., 1957. *A treatise on Limnology*, 1 vol., 1, 1015 p. J. Wiley and Sons, ed. New-York.

[100] JACQUET J., 1949. Recherches écologiques sur le littoral de la Manche. *Encycl. Biogéogr. Ecol.*, V, 1 vol., 373 p., Lechevalier éd. Paris. (Bibliographie très importante).

[101] JACQUET J, 1950. Au sujet de l'équipement des laboratoires agricoles et vétérinaires : réalisation d'un camion-laboratoire. *C. R. Acad. Agric. Fr*, **36**, 92-95.

[102] JOURNAUX A., 1953. Phénomènes de sédimentation dans le bassin de la Sélune. *Bull. Ass. Géogr. Fr.*, **231-232**, 14.

[103] JUGET J., 1958. Recherche sur la Faune de fond du Léman et lac d'Annecy. *Ann. St. Centr. Hydrobiol. Appl.*, **7**, 7-96.

[104] KIEFFER J. J., 1925. Diptères (Nématocères piqueurs), Chironomidae, Coratopogoninae. *Faune de France*, **11**, 1 vol.

[105] KOMARCK J., 1958. Die taxonomische Revision der Planktisschen Blaualgen der Tschechoslowskei. *Algol. Stud.*, Prague, 1 vol.

[106] KRAUSE H. R., 1961. Acides organiques comme produits intermédiaires solubles de la décomposition *post mortem* du zooplancton d'eau douce. *Die Naturvissenschaften*, **11**, 434-435.

[107] LAPORTE J., 1931. Recherches sur la biologie et la systématique des Desmidiées. (Thèse de doctorat). *Encycl. Biol.*, **9**.

[108] LEDERER E., 1960. La chromatographie en chimie organique et biologique. *Monographies de chimie organique*, III, 2 vol. Masson éd. Paris.

[109] LEFÈVRE M., 1932. Monographie des espèces d'eau douce du genre *Peridinium*. (Thèse Caen). *Arch. Bot.*, 1 vol.

[110] LEFÈVRE M., MANGUIN E., 1938. Sur la persistance pendant l'hiver d'algues d'eau douce à l'état végétatif. *Rev. gén. Bot.*, **50**, 501-526.

[111] LEFÈVRE M., BOURRELLY P., 1939. Sur la stabilité de l'ornementation chez les espèces du genre *Pediastrum* MEYEN. *C. R. Acad. Sci.*, **208**, 368-370.

[112] LEFÈVRE M., 1949. Un intéressant problème d'hydrobiologie : l'origine, le métabolisme et l'évolution des fleurs d'eau. *Rev. Scient.*, **3**, 225, 8, 369-376.

[113] LEFÈVRE M., JAKOB H., NISBET M., 1952. Auto et hétéroantagonisme chez les algues d'eau douce *Ann. St. Centr. Hydrobiol. Appl.*, **4**.

[114] LEFÈVRE M., 1958. De l'influence des matières organiques sur la nature et l'abondance du plancton. *Ann. St. Centr. Hydrobiol. Appl.*, **7**.

[115] LEHN H., 1963. Quelques données printanières sur les relations isothermes-phytoplancton dans le lac de Constance. *Arch. Hydrobiol. Dtsch.*, **59**, 1, 1-25.

[116] LEMMERMANN E., BRUNTHALLER J., PASCHER A., 1915. Chlorophyceae. II Tétrasporales, protococcales. *Süsswasser Flora Deutsch. Öster. und der Schweiz.*, **5**, 1 vol.

[117] LENHARD G., ROSS W. R., DU PLOOY A., 1962. Une étude des méthodes de classification des dépôts de fond des eaux naturelles. *Hydrobiologia*, **20**, 223-240.

[118] LUCAS A., 1963. Les conséquence du froid sur la faune dans le massif armoricain (hiver 1963). *Penn ar Bed, Fr.*, **4**, 32, 1-10.

[119] LUND J. W. G., 1949. Studies on *Asterionella*. I. The origine and nature of the cells producing seasonal maxima. *J. Ecol.*, **37**, (2), 389-419.

[120] LUND J. W. G., 1950. Studies on *Asterionella*. II. Nutrient depletion and the spring maximum. *J. Ecol.*, **38**, (1), 15-35.

[121] LUND J. W. G., 1954. The seasonal cycle of the plankton diatom : *Melosira italica* (EHR.)KÜTZ. subsp. *subartica* O. MULLER. *J. Ecol.*, **42**.

[122] LUND J. W. G., 1962. The periodicity of *Melosira islandica* in great Slave lake. *J. Fish. Res. Board Can.*, **19**, 3, 501-504.

[123] LUND J. W. G., 1962. Phytoplankton from somes lakes in northern Saskatchevan and great Slave lake. *Canad. J. Bot.*, **11**, 1499-1514.

[124] MARVAN P., 1960. Notes on the application of membrane filtration for quantitative phytoplankton research. *Scient. Papers, Inst. Chem. Technol., Prague*, **4**, 399.

[125] MC LACHLAN J., GORHAM P. R., 1961. Growth of *Microcystis aeruginosa* KÜTZ, in a precipitate free medium buffered with Tris. *Canad. J. Microbiol.*, **7**.

[126] MC LACHLAN J., GORHAM P. R., 1962. Effects of pH and nitrogen sources on growth of *Microcystis aeruginosa* KÜTZ. *Canad. J. Microbiol.*, **8**, 1, 1-2.

[127] MC LACHLAN J., HAMMER U. T., GORHAM P. R., 1963. Observations on the growth and colony habits of ten strains of *Aphanizomenon flos aquae*. *Phycologia*, **2**, (4).

[128] MERLO S., 1959. Distribution et fréquence du plancton dans lac de Garde. *Bull. Zool. Ital.*, **26**, 2, 383-396.

[129] MORTIMER C. H., 1941-1942. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. *J. Ecol.*, **29**, 2, 280-329, et *J. Ecol.*, **30**, 1, 147-201.

[130] PACAUD A., 1939. Contribution à l'écologie des Cladocères. *Bull. Biol. Fr. Belg. Supp.*, **25**, 1 vol., 260 p.

[131] PASCHER A., LEMMERMANN E., 1913. Flagellatae. II. *Süsswasser Flora Deutsch. Öster. und Schweiz.*, **2**, 1 vol.

[132] PASCHER A., LEMMERMANN E., 1914. Flagellatae. I. *Süsswasser Flora Deutsch. Öster. und Schweiz.*, **1**, 1 vol.

[133] PASCHER A., LEMMERMANN E., 1927. Volvocales, Phytomonadinae. Flagellatae IV. Chlorophyceae. I. *Süsswasser Flora Deutsch. Öster. und Schweiz.*, **4**, 1 vol.

[134] PASCHER A., SCHILLER J., MIGULA W., 1925. Heterokontae, Phaeophyta, Rhodophyta, Charophyta. *Süsswasser Flora Deutsch. Öster. und Schweiz.*, **11**, 1 vol.

[135] PASCHER A., LEMMERMANN E., 1927. Heterokontae. *Rabenh. Krypt. Flora*, **12**, 1 vol.

[136] PEARSALL W. H., 1923. A theory of Diatom periodicity. *J. Ecol.*, **11**, 165-183.

[137] PEARSALL W. H., 1924. Phytoplankton and environment in the Englisk lake District. *Rev. Algol.*, **1**, 53-67.

[138] PEARSALL W. H., 1925. Phytoplankton on the English lakes. *J. Linn. Soc. London, Bot.*, **47**, 55-73.

[139] PEARSALL W. H., 1930. Phytoplankton in the English lakes. The proportion in the water of some dissolved substances of biological importance. *J. Ecol.*, **18**, 306-320.

[140] PEARSALL W. H., 1932. Phytoplankton in the English Lakes. The composition of phytoplancton in relation to dissolved substances. *J. Ecol.*, **20**, 241-262.

[141] PERRIER R., 1954. Faune de la France. Delagrave éd. Paris, 5 vol. (**1A**, **1B**, **2**, **3**, **4**).

[142] PÉSEZ M., POIRIER P., 1954. Méthodes et réactions de l'analyse organique Masson éd., Paris, 3 vol., 278, 280 et 298 p.

[143] PIERRE F., 1951. Les conditions écologiques et le peuplement des vases d'eau douce. *Encycl. Biogéogr. Ecol.*, **4**, 1 vol., 111 p.

[144] PIGUET E., BRETSCHER F., 1913. Oligochètes. *Catalogue des Invertébrés de la Suisse.*, **7**, 1 vol.

[145] PRÉVOST A. R., 1961. Traité de Systématique bactérienne. Dunod éd., Paris, 2 vol.

[146] PRINGSHEIM E. G., 1949. The filamentous bacteria *Sphaerotilus*, *Leptothrix*, *Cladothrix* and their relations to iron and manganese. *Phil. Trans. Roy. Soc. London Biol. Sc*, **233**, 453-482.

[147] REBEYROTTE P., DECRAMER P. L., 1958. *Microélectrophorèse, électrorhéophorèse.* Lérés éd., Paris, 1 vol., 158 p.

[148] RODHE W., 1948. Environmental requirements of freshwater plankton alga. *Symb. Bot. Upsal.*, **10**, 1-149.

[149] RIVIÈRE A., 1942. Les conditions physico-chimiques de la sédimentation ferrugineuse en milieu marin. *C. R. Soc. Géol. Fr.*, **16**, 200.

[150] RIVIÈRE A., VERNHET S., 1959. États d'oxydo-réduction dans les milieux naturels. Techniques de détermination directe du rH. Quelques résultats en milieu lagunaire. *Cahiers C. C. O. E. C.*, XI, 5, 309-314.

[151] RODIER J., 1960. *L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau*, 2e éd. Dunod éd. Paris, 1 vol. 358 p.

[152] RUTTNER F., 1952. *Grundiss der Limnologie*. Traduction anglaise, 1 vol., 242 p.

[153] RYLOV W. M., 1935. Das Zooplankton der Binnengewässer. *Die Binnengewässer.*, **15**, 1 vol., 272 p.

[154] SCHILLER J., 1933. Dinoflagellatae. *Rabenh. Krypto Flora*, **10**, 3, 1, 1 vol.

[155] SCHILLER J., 1935. Dinoflagellatae. *Rabenh. Krypto Flora*, **10**, 3, 2, 1 vol.

[156] SCHILLING A. J., 1913. Dinoflagellatae. *Süsswasser Flora Deutsch. Öster. und der Schweiz.*, **3**, 1 vol.

[157] SÉGUY E., 1925. Diptères Nématocères piqueurs. *Faune de France*, **12**, 1 vol.

[158] SKUJA H., 1955. *Taxonomische un Biologische studien über das Phytoplankton schwedischer Binnengewässer.*, 1 vol.

[159] SMITH G. M., 1950. *The freshwater alga of the United States*, 2e éd., Mc Graw Hill, New York, 1 vol.

[160] SMITH G. M., 1951. *Manual of Phycology. An introduction to the Alga and their biology.* Waltham Mass. U. S. A., 1 vol.

[161] STAUDINGER H., 1958. *Introduction à l'analyse organique qualitative*, 2e éd. Dunod, Paris, 1 vol., 118 p.

[162] STRÖM K. M., 1945. The temperature of maximum densite in freshwaters. *Geofys. Publik*, **16**, 3, 1.

[163] TEILLING G., 1941. *Aeruginosa* oder *Flos-aquae*, eine kleine *Microcystis* studie. *Svensk. Bot. Tidskrift.*, **135**, (4), 1.

[164] TEILLING G., 1946. Zur Phytoplanktonflora Schwedens. *Bot. Notiser.*, **1**.

[165] TEILLING G., 1947. *Staurastrum planctonicum* and *Staurastrum pingue*. A study of planktic evolution *Svensk. Bot. Tidskrift.*, **41**, (2).

[166] WALLENTYNE J. R., 1955. Biochemical limnology. *Sciences-U. S. A.*, **119**, 605-606.

[167] VALLENTYNE J. R., 1955. Sedimentary chlorophyll determination as a paleobotanical method. *Canad. J. Bot.*, **33**, (4), 304-313.

[168] VALLENTYNE J. R., 1956. The relation between free sugars and sedimentary chlorophyll in lake muds. *Ecology*, **37**, (3), 495-500.

[169] VALLENTYNE J. R., WHITTAKER J. R., 1957. On the occurence of free sugars in lake sediment extracts. *Limnlo. Oceano.*, **1**, (2), 98-110.

[170] VALLENTYNE J. R., 1957. The principles of modern Limnology. *Amer. Scient.*, **45**, 3, 218-244.

[171] VAN BENEDEN G., 1949. Le dosage des matières organiques dans les eaux. *Bull. C. B. E. D. E.*, **3**, 1, 117-181.

[172] VIVIER P., et *al.*, 1956. Le lac d'Éguzon. *Ann. St. Centr. Hydrobiol Appl.*, **6**, 1-233.

[173] VIVIER P., 1960. Température et oxygène dissous en profondeur dans les lacs de barrage artificiels. français. *Schweiz. z. Hydrologie*, **22**, 1, 350-364.

[174] VIVIER P., 1961. Les lacs de barrage artificiels du Massif central français. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **14**, 625-632.

[175] VIVIER P., 1961. *La vie dans les eaux douces*. Que sais-je ? **233**, P. U. F. Paris, 3e éd., 1 vol., 128 p.

[176] VLES F., GEX M., 1943. Sur une pile dont la f. é. m. donne directement le rH de Clark. *C. R. Acad. Sci.*, **217**, 24, 601-603.

[177] VLES F., GEX M., 1944. Mesure directe du rH par le couple électrode de verre-platine. *C. R. Soc. Phys. Biol, Fr.*, **72**, 101.

[178] WARD H. B., WHIPPLE G. C., 1918. *Fresh-water biology* (1re éd., réimpression 1945), J. Wiley, New York, 1 vol., 1111 p.

[179] WELCH P. S., 1935. *Limnology*. Mc Graw-Hill, New York, 1 vol., 471 p.

[180] WELCH P. S., 1948. *Limnological methods*, Mc Graw Hill, New York, 1 vol., 381 p.

[181] WEST W., WEST G. S., 1904-1912. *A monograph of the British* Desmidiaceae. Ray Soc. éd., Londres, 4 vol.

[182] WILLEMART A., CHAUX R., 1958. *Les grandes fonctions de la chimie organique*, 2e éd., Dunod, Paris, 1 vol., 928 p.

[183] WUNDERLY Ch., 1956. *Électrophorèse sur papier*. Vigot Frères éd., Paris, 1 vol., 131 p.

[184] WURTZ A. G., 1957. Champignons, bactéries et algues des eaux poluées. *Bull. Fr. Pisc.*, **182-184**.

[185] ZEHNDER A., HUGHES E. O., 1958. The antialgal activity of actidione. *Canad. J. Microbiol.*, **4**.

[186] ZEHNDER A., GORHAM P. R., 1960. Factor influencing the growth of *Microcystis aeruginosa* KÜTZ. EMEND. ELENKIN. *Canad. J. Microbiol.*, **6**.

[187] N. N. (sous direction de J. LOISELEUR) 1963. *Techniques de laboratoire*. Masson éd., Paris, 3e éd. 3 vol.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

RÔLE DES ORGANISMES DU PLANCTON DANS LES SÉDIMENTS LACUSTRES ANCIENS

VU
Le Président de la Thèse
DANGEARD

VU
Le Doyen
Illisible

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :
Caen, le 27 octobre 1965
Le Recteur, Président du Conseil de l'Université
Illisible